Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Комсомольский на Амуре государственный технический университет"

Сериков А. В.

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Утверждено в качестве учебного пособия
Ученым советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
"Комсомольский на Амуре государственный технический университет"

Комсомольск на Амуре, 2015

УДК 621.314(07)
ББК 31.261.8–02я7
С327
ISBN 978–5–7765–1202–5

Рецензенты:

Кафедра "Электротехника, электроника и электромеханика" ФГБОУ ВПО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения", профессор кафедры, доктор техн. наук Власьевский С. В.; Крупский Р. Ф., канд. техн. наук, начальник научно–производственного отдела филиала ПАО "Авиационная холдинговая компания "Сухой", Комсомольский на Амуре авиационный завод им. Ю. А. Гагарина"

Расчет трансформаторов малой мощности. Учебное пособие.

Сериков А. В. Комсомольск на Амуре, ФГБОУ ВПО "КнАГТУ", 2015.

Рассмотрены конструктивные особенности трансформаторов малой мощности. Содержится методика расчета трансформаторов, справочные материалы необходимые для выполнения курсовой работы, пример расчета трансформатора малой мощности, контрольные вопросы для подготовки к защите курсовой работы.
Учебное пособие предназначено для студентов специальности "Специальные электромеханические системы".

Оглавление

	стр.
Введение	2
1. Особенности трансформаторов малой мощности с воздушным охлаждением.	2
2. Материалы, применяемые при изготовлении трансформаторов малой мощности.	6
3. Методика расчета трансформатора.	7
4. Пример расчета трансформатора.	27
5. Контрольные вопросы к защите курсовой работы.	42
Заключение	43
Библиографический список	43
Приложение 1. Обмоточные провода.	44
Приложение 2. Сердечники трансформаторов.	46
Приложение 3. Задание на намотку трансформатора.	49

Введение

Трансформаторы малой мощности (ТММ) широко используются в современных схемах для электрического питания различных систем автоматики, телемеханики и связи, а также для питания электротехнических устройств: выпрямителей, фильтров, статических преобразователей, стабилизаторов и регуляторов напряжения и тока. Расчет этих трансформаторов имеет ряд особенностей в отличие от трансформаторов общего назначения. В ряде случаев к ним предъявляются самые жесткие требования по весовым и габаритным показателям, вместе с тем достаточно остро стоит вопрос экономической эффективности трансформаторов, что связано с большими масштабами их производства. В связи с тем что курсовая работа выполняется параллельно с изучением теоретического курса "Трансформаторы и дроссели малой мощности", в учебном пособии приводятся основные сведения о конструктивных особенностях таких трансформаторов. В практике проектирования выбор основных размеров сердечника осуществляется обычно с использованием нормализованных рядов, но в некоторых случаях использование стандартного сердечника не удовлетворяет каким–либо техническим требованиям, заданным в проекте, поэтому в курсовой работе рассматривается методика расчетного определения размеров сердечника.

1. Особенности трансформаторов малой мощности с воздушным охлаждением.

Конструкция ТММ должна обеспечивать его надежную работу в течение всего заданного срока службы (10…20 тыс. *ч* и более), поэтому в зависимости от места установки к конструкции могут предъявляться следующие требования: высокая механическая прочность, нагревостойкость, влагостойкость, электрическая прочность, экономичность. Основными элементами конструкции трансформаторов являются магнитопровод и катушки с обмотками. В зависимости от технологии изготовления магнитопроводы трансформаторов небольшой мощности делятся на пластинчатые (при толщине листа не менее 0,15 *мм*.) и ленточные. По конструктивному исполнению пластинчатые и ленточные магнитопроводы делятся на три основные типа: стержневые, броневые и кольцевые (рис. 1). Стержневые пластинчатые магнитопроводы обычно собираются из прямоугольных пластин одинаковой ширины, одинаковых П–образных пластин (см. рис. 1, *а*) или из П–образных пластин и прямоугольных перекрышек.

Броневые пластинчатые магнитопроводы собираются из Ш–образных пластин и прямоугольных перекрышек (см. рис. 1, *б*), из одинаковых Ш–образных пластин с разъемом посередине стержня или из сплошных пластин с просечкой среднего стержня. Для уменьшения магнитного сопротивления в местах стыка отдельных пластин их собирают вперeплет, т. е. в одном слое перекрышка находится вверху, а в соседних – внизу (разъем по ярму, см. рис. 1, *б*). Стержневые и броневые витые ленточные магнитопроводы собираются встык из отдельных сердечников подковообразной формы с поперечным или продольным разрезом (см. рис. 1, *в*, *г*). Для получения возможно меньшего магнитного сопротивления в местах стыка разрезных ленточных сердечников их торцевые поверхности подвергаются шлифовке. Кольцевые пластинчатые магнитопроводы (см. рис. 1, *д*) собираются из отдельных штампованных колец. Кольцевые ленточные магнитопроводы (см. рис. 1, *е*) изготавливаются путем навивки ленты требуемой ширины на оправу заданного диаметра, они обладают минимальным магнитным сопротивлением, но сложны для изготовления трансформатора (намотка обмотки непосредственно на магнитопровод). Для уменьшения магнитного сопротивления разрезных ленточных магнитопроводов обе части магнитопровода при сборке трансформатора склеиваются при помощи специальной ферромагнитной пасты, содержащей карбонильное железо. Иногда склеивают и собираемые встык пластинчатые магнитопроводы.

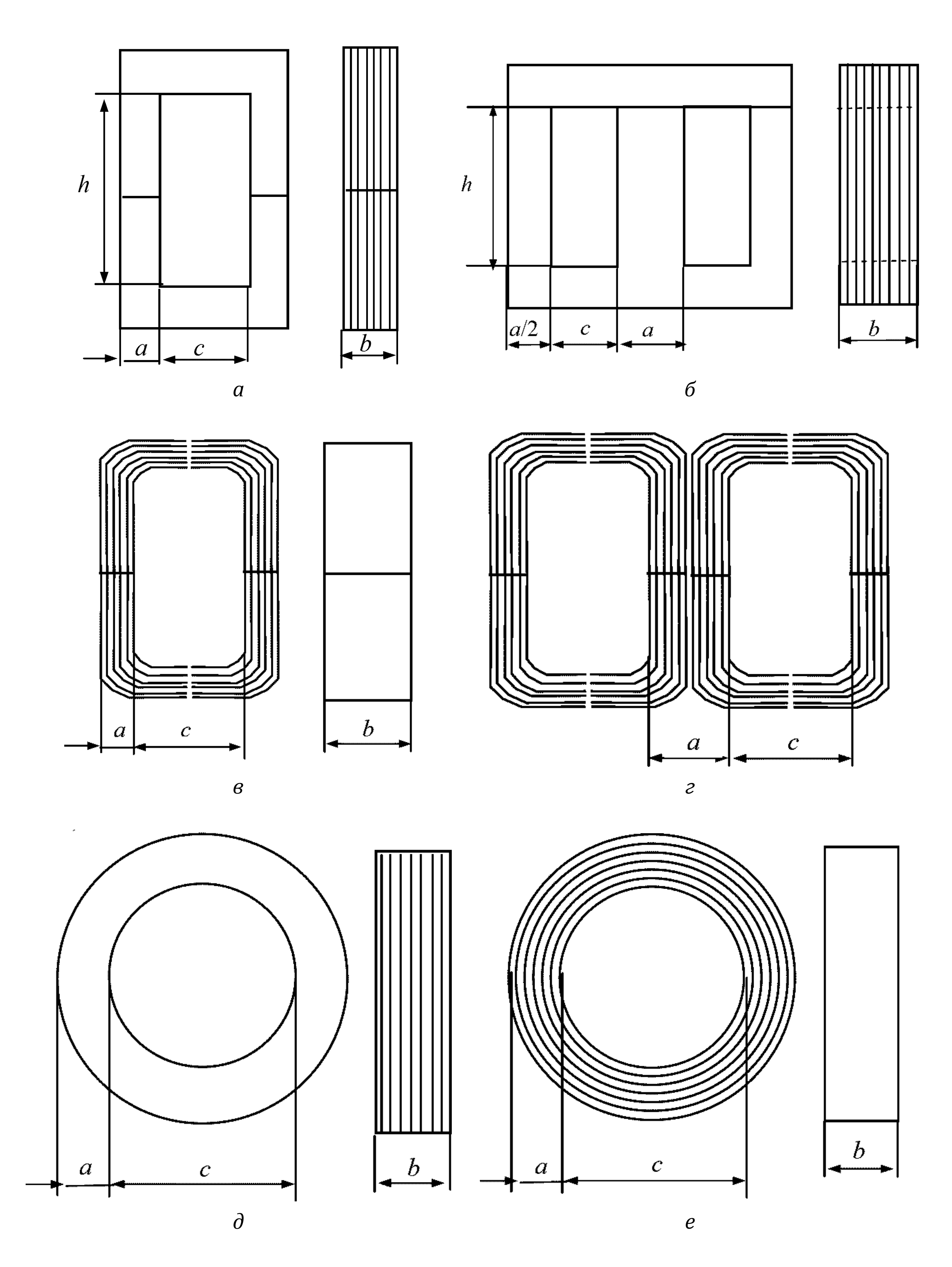


Рис. 1. Конструкции магнитопроводов:
а – стержневого пластинчатого; *б* – броневого пластинчатого;
в – стержневого ленточного; *г* – броневого ленточного;
д – кольцевого пластинчатого; *е* – кольцевого ленточного.

Катушки трансформаторов представляют собой совокупность обмоток и системы изоляции. Обмотки изготавливаются из изолированных проводов; кроме того, предусматривается изоляция катушек от магнитопровода, межслоевая изоляция, внешняя (наружная) изоляция катушек. Изоляция обмотки от стержневых и броневых магнитопроводов осуществляется при помощи каркасов, изготовляемых из не гигроскопичного материала, обладающего требуемой электрической и механической прочностью.

Простейший и наиболее распространенный тип каркаса представляет собой гильзу, изготовляемую из электротехнического картона (электрокартона, см. рис. 2, *а*). Часто применяются склеенные из электрокартона каркасы (рис. 2, *б*). При массовом производстве трансформаторов используются сборные каркасы, изготовленные из твердых изоляционных материалов (гетинакса или текстолита) или прессованные из пластмассы каркасы. Кроме магнитопровода и обмоток, в конструкцию трансформатора малой мощности входят детали для сборки отдельных частей сердечника, крепления собранного трансформатора, присоединения концов обмоток (клеммы), защиты от механических повреждений и влагозащиты. Пластинчатые магнитопроводы трансформаторов после сборки стягиваются шпильками посредством металлических пластинок или специальных накладок, которые одновременно используются и для крепления трансформатора. При малых размерах магнитопровода для стяжки железа иногда используют обойму специальной формы в которую запрессовывают собранный трансформатор. Обойма имеет ушки для крепления к шасси. Применяется также сборка пластинчатых магнитопроводов в пластмассовых обоймах.

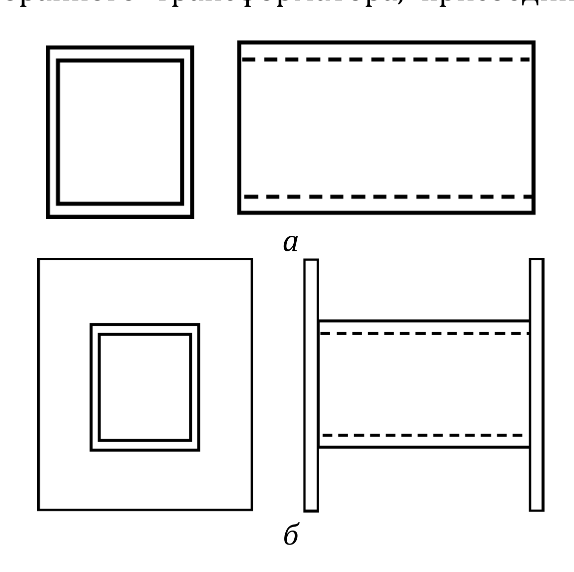


Рис. 2. Гильза (*а*) и каркас (*б*) из электрокартона.

На рис. 3, 4 и 5 изображены варианты конструктивного исполнения трансформаторов малой мощности. Броневой тип трансформатора (пластинчатый, см. рис. 3 или ленточный, см. рис. 4) имеет одну катушку. Его достоинства – более высокий коэффициент заполнения окна сердечника обмоточным проводом, частичная защита обмотки ярмом сердечника от механических повреждений. Стержневой тип трансформатора (см. рис. 5) может быть как однокатушечным, так и двухкатушечным. Преимущество однокатушечного варианта – лучшая технологичность исполнения. В двухкатушечном варианте на каждой катушке размещается половина витков каждой обмотки. Достоинства двухкатушечного – малая индуктивность рассеяния вследствие меньшего числа витков на каждой катушке, меньшая толщина намотки, меньший расход обмоточных проводов из–за уменьшения средней длины витка, относительно увеличенная поверхность охлаждения. На рис. 4 приведена конструкция трансформатора с ленточным магнитопроводом броневого типа мощностью до 100 *ВА*. Каркас трансформатора состоит из штампованного кожуха 4, удерживающей пластины 5 и нажимных винтов 6. Сборка трансформатора выполняется в следующей последовательности: при снятой пластине 5 вставляются нижние половины сердечников 1, затем надеваются катушки 3, вставляются верхние половины сердечников 8, отгибаются вертикальные стойки кожуха 4, в отверстия кожуха вставляются заплечики 7 удерживающей пластины 5. С помощью нажимных винтов 6 сжимаются верхние и нижние половины сердечника. Для фиксации катушки в вертикальном положении служит выступ 2 в кожухе.

Для защиты обмоток от воздействия влаги их пропитывают изоляционными лаками. Пропитка повышает влагостойкость обмотки, увеличивает ее электрическую и механическую прочность, повышает допустимую температуру нагрева и увеличивает теплопроводность от нагретых частей к наружной охлаждаемой поверхности.

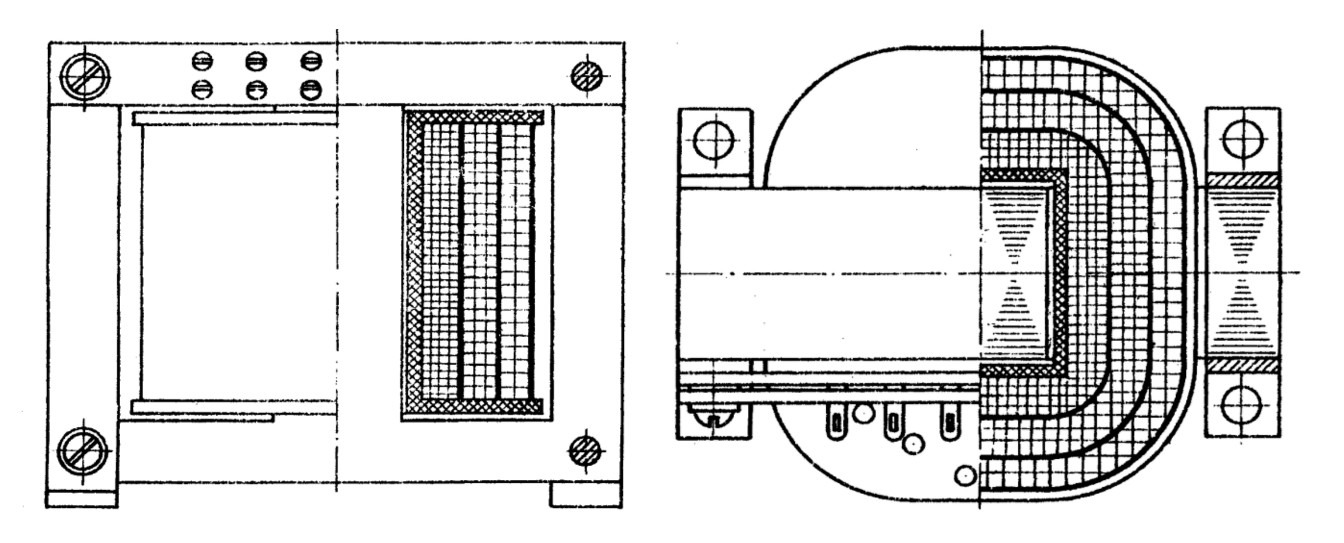


Рис. 3. Броневой пластинчатый трансформатор.

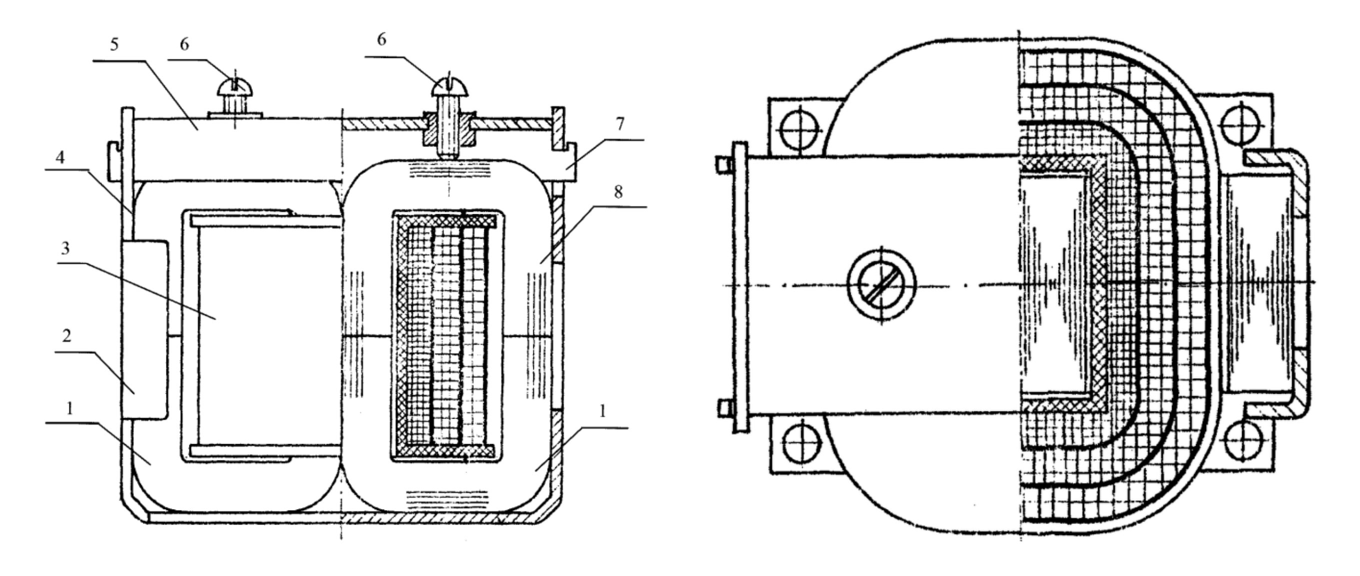


Рис. 4. Броневой ленточный трансформатор.

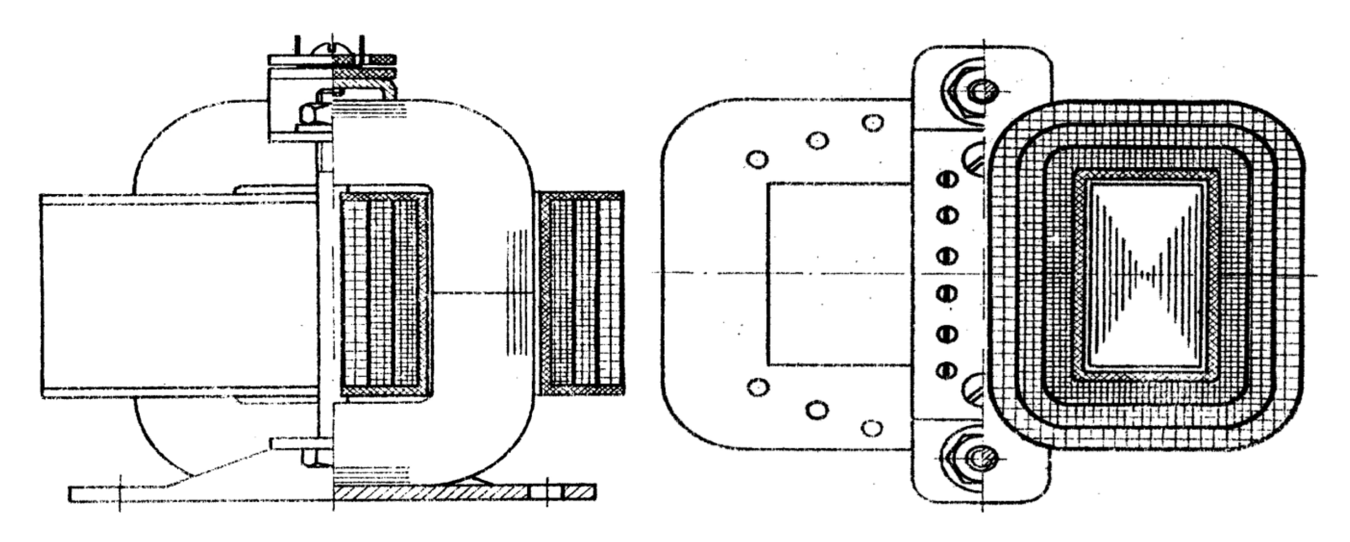


Рис. 5. Стержневой ленточный трансформатор.

2. Материалы, применяемые при изготовлении трансформаторов малой мощности.

Магнитные материалы.

К магнитным материалам, используемым для изготовления магнитопроводов ТММ, предъявляются следующие требования: высокая магнитная проницаемость, малые потери на вихревые токи и перемагничивание, малая себестоимость. Для изготовления сердечников ТММ (трансформаторов малой мощности) в диапазоне от единиц до нескольких сотен вольт–ампер в качестве магнитного материала широко используются горяче– и холоднокатаные электротехнические стали разных марок и толщин.

Магнитные свойства горячекатаных сталей практически одинаковы во всех направлениях проката. Холоднокатаные стали обладают меньшими удельными потерями и значительно лучшими электромагнитными характеристиками вдоль направления проката по сравнению с горячекатаными. Поэтому из горячекатаных сталей выполняются пластинчатые магнитопроводы, а из холоднокатаных – ленточные.

При расчете трансформатора на минимум стоимости следует выбирать горячекатаные стали, а на минимум массы – холоднокатаные. С учетом наибольшего практического применения при курсовом проектировании ТММ рекомендуются следующие марки сталей:

1) при частоте 50 *гц* для пластинчатых магнитопроводов – горячекатаная сталь марки 1512 или 1521 с толщиной листов 0,35 (0,5) *мм*.

2) при частоте 400 *гц* для пластинчатых магнитопроводов – горячекатаная сталь марки 1512 или 1521 с толщиной листов 0,2 *мм*.

3) при частоте 50 *гц* для ленточных магнитопроводов – холоднокатаная сталь марки 3411 или 3412 с толщиной ленты 0,35 *мм*;

4) при частоте 400 *гц* для ленточных магнитопроводов – холоднокатаная сталь марки 3411 или 3412 с толщиной ленты 0,2 *мм*.

Обмоточные провода.

При изготовлении обмоток используются обмоточные провода широкой номенклатуры, в качестве материала проволоки берется в основном медь, имеющая малое удельное сопротивление. Для расчета ТММ рекомендуются следующие марки проводов:

1) ПЭЛ – провод эмалированный лакостойкий, предназначен для работы при температуре до 105°С. По стоимости – относительно дешевый, применяется в трансформаторах, которые рассчитываются на минимум стоимости. Недостаток провода – малая механическая прочность его изоляции.

2) ПЭВ–1 – провод, изолированный высокопрочной эмалью (винифлекс) в один слой. Применяется при напряжениях до 500 *в*, удовлетворяет повышенным требованиям надежности, рабочая температура до 105°С. Рекомендуется для трансформаторов наименьшей массы.

3) ПЭВ–2 – аналогичный провод, но с изоляцией в два слоя. Применяется при требованиях большой надежности и при напряжениях обмоток свыше 500 *в*. Если диаметр обмоточного провода находится в пределах 0,35… 2,0 *мм*., то выводные концы обмоток выполняются из самого обмоточного провода, если же меньше 0,35 *мм*. или больше 2,0 *мм*. – специальными проводами марок МГШДО (при рабочем напряжении до 127 *в*), ПТЛ (до 250 *в*) и МГТФЛ (до 500 *в*).

Электроизоляционные материалы.

Данные материалы в трансформаторах применяются для изоляции токоведущих частей. В зависимости от назначения изоляция бывает межобмоточной, межслоевой, межвитковой и основной (изоляция между катушкой и сердечником).
К изоляции с рабочей температурой до 105°С (класс изоляции А) относятся отдельные материалы на основе хлопчатобумажной и шелковой тканей или на основе целлюлозы, не пропитанные или пропитанные лаками. В качестве материалов, используемых для межслоевой и межобмоточной изоляции применяются бумаги пропитанные изоляционным компаундом: кабельная марки К–12, телефонная КТН; конденсаторная КОН–1; пропиточная марок ЭИП–50 и ЭИП–63Б. Из тканевых материалов используются лакоткани марок ЛХ1, ЛХ2, ЛШ1, ЛШ2. Материалом для сборных каркасов катушек служит текстолит, гетинакс, электрокартон, для прессованных и литых – пресс–порошки К21–22, К–114–35 и другие.

3. Методика расчета трансформатора.

Методика расчета однофазного трансформатора малой мощности изложена на основе специальной литературы [Л. 1; 2].

Определение расчетной мощности.

Для определения расчетной мощности трансформатора можно воспользоваться приближенной формулой:

$$Sp \approx S_2 + S_3$$

где *Sp* – расчетная мощность трансформатора, *ВА*; S_2, S_3 – номинальные полные мощности вторичных обмоток, *ВА*. При ($S_2 + S_3$) ≤ 100 *ВА* следует уточнить расчетную мощность по формуле:

$$Sp \approx \frac{S_2 + S_3}{2} \times \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)$$

где η – коэффициент полезного действия *кпд* выбирается в соответствии с табл. 1.

Таблица 1.
Выбор *кпд*

Величина *кпд* при расчетной мощности трансформатора, *ВА*.				
частота, *гц*	15…50	50…150	150…300	300…1000
50	0,6…0,8	0,8…0,9	0,9…0,93	0,93…0,95
400	0,87	0,87…0,94	0,94…0,96	0,96…0,97

Выбор конструкции магнитопровода.

Выбор конструкции магнитопровода производится в соответствии с величиной расчетной мощности и частотой питающего напряжения. Для трансформаторов с максимальным напряжением до 1000 *в* при частотах 50 и 400 *гц* можно использовать следующие рекомендации. При мощностях до 30 *ВА* рекомендуются пластинчатые броневые трансформаторы, они технологичнее в изготовлении и проще по конструкции. При мощностях 30…100 *ВА* рекомендуется изготавливать также броневые трансформаторы при использовании как пластинчатых, так и ленточных магнитопроводов в зависимости от расчетного условия (минимум стоимости – пластинчатые, минимум массы – ленточные). Для трансформаторов мощностью выше 100 *ВА* применяются и броневые и стержневые сердечники. Однако более выгодными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками и ленточными разъемными сердечниками, поскольку они имеют большую поверхность охлаждения и меньшую среднюю длину витка по сравнению с броневыми.

Окончательное решение о выборе конструкции магнитопровода, в данном случае, зависит от условия расчета. При минимуме стоимости целесообразен броневой пластинчатый, а при минимуме массы – стержневой ленточный.

Выбор материала сердечника.

Для уменьшения потерь на вихревые токи снижают толщину стали, но ее уменьшение при данной частоте целесообразно только до определенных пределов, после чего рост потерь на гистерезис сводит на нет уменьшение потерь на вихревые токи. Поэтому для каждой частоты существует своя оптимальная толщина материала. При выборе стали для сердечника следует учитывать, что при уменьшении толщины листов возрастает стоимость трансформатора, но наряду с этим уменьшаются удельные потери. Выбор марки стали и ее толщины производится в соответствии с заданной частотой сети и условием расчета (минимум стоимости или минимум массы) в соответствии с табл. 2.

Таблица 2. Выбор толщины и марки стали.

частота, *гц*	расчетное условие	марка стали	толщина, *мм.*
50	минимум стоимости	1512	0,5
	минимум массы	3411	0,35
400	минимум стоимости	1521	0,2
	минимум массы	3411	0,2

Выбор предварительных значений максимальной магнитной индукции B_{MAX}, плотности тока j_{CP}, коэффициента заполнения окна k_{OK} и коэффициента заполнения магнитопровода k_{CT}.

Приведенные в табл. 3 – 6 значения указанных величин могут использоваться как рекомендуемые для трансформаторов при величине напряжения на зажимах обмотки, не превышающей 500 *в*.

Таблица 3. Выбор магнитной индукции.

конструкция магнитопровода	частота, *гц*	магнитная индукция B_{MAX}, *Тл*, при S_P, *ВА*			
		15…50	50…150	150…300	300… 1000
Броневая пластинчатая	50	1,3	1,35	1,35	1,3
Броневая ленточная		1,65	1,65	1,65	1,65
Стержневая ленточная		1,6	1,7	1,7	1,7
Броневая пластинчатая	400	1,2	1,2	1,15	1,0
Броневая ленточная		1,4	1,4	1,4	1,3
Стержневая ленточная		1,6	1,5	1,3	1,0

Таблица 4. Выбор плотности тока.

конструкция магнитопровода	частота, *гц*	плотность тока j_{CP}, $A/мм^2$, при S_P, *ВА*			
		15…50	50…150	150…300	300… 1000
Броневая пластинчатая	50	3,0…2,4	2,4…2,0	2,0…1,7	1,7…1,4
Броневая ленточная		3,5…2,7	2,7…2,4	2,4…2,3	2,3…1,8
Стержневая ленточная		5,2…3,8	3,8…3,0	3,0…2,4	2,4…1,7
Броневая пластинчатая	400	5,5…5,0	5,0…4,0	4,0…2,8	2,8…1,6
Броневая ленточная		7,8…6,5	6,5…4,0	4,0…2,7	2,7…1,5
Стержневая ленточная		9,6…5,6	5,6…3,5	3,5…2,8	2,8…1,8

Таблица 5. Выбор коэффициента заполнения окна.

Конструкция магнитопровода	частота *гц*	коэффициент заполнения окна $k_{ОК}$ при S_P, *ВА*			
		15…50	50…150	150…300	300…1000
Броневая пластинчатая	50	0,25…0,26	0,26…0,27	0,27…0,30	0,30…0,33
Броневая ленточная		0,23…0,26	0,26…0,27	0,27…0,30	0,30…0,33
Стержневая ленточная		0,21…0,24	0,24…0,25	0,25…0,30	0,30
Броневая пластинчатая	400	0,19…0,23	0,23…0,25	0,25…0,26	0,26…0,30
Броневая ленточная		0,17…0,19	0,19…0,25	0,25…0,26	0,26…0,30
Стержневая ленточная		0,15…0,21	0,21…0,24	0,24	0,24…0,30

Таблица 6. Выбор коэффициента заполнения магнитопровода.

Конструкция магнитопровода	Коэффициент заполнения магнитопровода $k_{СТ}$ при толщине стали, *мм*.			
	0,1	0,15	0,2	0,35
Пластинчатая	0,7 (0,75)	–	0,85 (0,89)	0,9 (0,94)
Ленточная	–	0,9	0,91	0,93

Примечание.
1. Коэффициенты заполнения для пластинчатых сердечников указаны при изоляции пластин лаком или фосфатной пленкой (в скобках).
2. Коэффициенты заполнения для ленточных сердечников указаны при изготовлении их методом штамповки и гибки ленты.

Определение токов в обмотках.

Активная I_{1A} и реактивная I_{1P}, *А*, составляющие тока первичной обмотки вычисляются следующим образом:

$$I_{1А} = \frac{S_1 \times cos\varphi_2 + S_3 \times cos\varphi_3}{\eta \times U_1} \qquad I_{1Р} = \frac{S_1 \times cos\varphi_2 + S_3 \times cos\varphi_3}{\eta \times U_1} \times I\mu$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, *в*; $cos\varphi_2$, $cos\varphi_3$ – коэффициенты мощности вторичных обмоток; $I\mu$ – ток намагничивания, *А*.
Величина тока намагничивания $I\mu$ для маломощного трансформатора предварительно может быть принята в пределах 35… 50% от активной составляющей I_{1A} (величина $I\mu$ уточняется в последующем расчете). Ток первичной обмотки I_1, *А*, находится по формуле

$$I_1 = \sqrt{I_{1А}^2 + I_{1Р}^2}$$

Токи вторичных обмоток I_2 и I_3, *А*, определяются по формулам:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} \qquad I_3 = \frac{S_3}{U_3}$$

Определение сечений и диаметров проводов обмоток.

Предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток рассчитываются по формулам:

$$q_{1ПР} = \frac{I_1}{j_{СР}} \qquad q_{2ПР} = \frac{I_2}{j_{СР}} \qquad q_{3ПР} = \frac{I_3}{j_{СР}}$$

где $q_{1ПР}$, $q_{2ПР}$, $q_{3ПР}$ – предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток, *м*²; $j_{СР}$ – среднее значение плотности тока в обмотках, $А/м^2$.

По таблице стандартных сечений и диаметров проводов (приложение 1) выбираются окончательные сечения проводов обмоток q_1, q_2, q_3, $м^2$, их диаметры без изоляции d_1, d_2, d_3, *м.*, и диаметры с изоляцией $d_{1И}$, $d_{2И}$, $d_{3И}$, *м*. Выбор марки провода определяется величиной рабочего напряжения обмотки. При напряжении обмоток до 500 *в* и токах до нескольких ампер рекомендуется применять провода марок ПЭВ–1 (допустимая температура нагрева 105°С), ПЭВТЛ–1 (120°С), ПЭТВ (130°С), ПСД (155°С), ПСДК (180°С). При выборе провода следует принять рабочую температуру ($\theta \le 105$°С), для которой рекомендуется провод марки ПЭВ–1 для диаметров 1…2 *мм*. и марки ПСД для диаметров больше 2 *мм*. По выбранным сечениям проводов уточняются плотности тока в обмотках:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} \qquad j_2 = \frac{I_2}{q_2} \qquad j_3 = \frac{I_3}{q_3}$$

где j_1, j_2, j_3 – плотности тока в соответствующих обмотках, $А/м^2$.

Определение поперечного сечения стержня сердечника.

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора (по стали) $Q_{СТРАСЧ}$, $м^2$, можно определить по формуле:

$$Q_{СТРАСЧ} = C \times \sqrt{\frac{\alpha \times S_1}{f \times B_{MAX} \times j_{СР}}}$$

где C – постоянный коэффициент (может быть принят: для трансформаторов броневого типа C = 0,7; для трансформаторов стержневого типа с прямоугольными катушками C = 0,6); α – отношение массы стали $G_{СТ}$ к массе меди $G_М$ (при расчете на минимум стоимости α = 4… 6; при расчете на минимум массы трансформатора α = 2… 3); S_1 – полная мощность первичной обмотки трансформатора, *ВА*; f – частота сети, *гц*; B_{MAX} – предварительное значение магнитной индукции в стержне, *Тл*; $j_{СР}$ – плотность тока в обмотках, $А/м^2$. Полная мощность первичной обмотки трансформатора вычисляется по формуле:

$$S_1 = U_1 \times I_1$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, *в*. Полное поперечное сечение стержня $Q_{СТПОЛН}$ (с учетом межлистовой изоляции), $м^2$, определяется по формуле:

$$Q_{СТПОЛН} = \frac{Q_{СТРАСЧ}}{k_{СТ}}$$

где $k_{СТ}$ – коэффициент заполнения сердечника сталью.

Определение числа витков обмоток трансформатора.

Приближенные значения действующих *эдс* в обмотках трансформатора могут быть определены по формулам:

$$E_1 = U_1 \times \left(1 - \frac{\Delta U_1\%}{100}\right) \qquad E_2 = U_2 \times \left(1 - \frac{\Delta U_2\%}{100}\right) \qquad E_3 = U_3 \times \left(1 - \frac{\Delta U_3\%}{100}\right)$$

где E_1, E_2, E_3 – *эдс* в обмотках трансформатора, *в*; $\Delta U_i\%$ – падение напряжения в соответствующей обмотке при нагрузке в процентах от номинального значения напряжения.
Величины падения напряжений $\Delta U_i\%$ зависят от многих факторов: конфигурации магнитопровода, величины рабочего напряжения, суммарной мощности вторичных обмоток, частоты тока сети. Ориентировочно их значения могут быть приняты в соответствии с рекомендациями (табл. 7).

Таблица 7. Выбор падения напряжения в обмотке при нагрузке.

частота, *гц*	конструкция магнитопровода	величина $\Delta U\%$	суммарная полная мощность вторичных обмоток, *ВА*.		
			15…50	50…150	150…300
50	Броневая	$\Delta U_1\%$	13,0...6,0	6,0...4,5	4,5...3,0
		$\Delta U_2\%=\Delta U_3\%$	18,0... 10,0	10,0...8,0	8,0...6,0
	Стержневая	$\Delta U_1\%$	12,0...5,5	5,5...4,0	4,0...3,0
		$\Delta U_2\%=\Delta U_3\%$	17,0...9,0	9,0...6,0	6,0...4,0
400	Броневая	$\Delta U_1\%$	8,0...4,0	4,0...1,5	1,5...1,0
		$\Delta U_2\%=\Delta U_3\%$	8,5...5,0	5,0...2,0	2,0...1,2
	Стержневая	$\Delta U_1\%$	5,0...2,0	2,0...1,0	1,0
		$\Delta U_2\%=\Delta U_3\%$	6,5...3,0	3,0...1,5	1,5...1,0

Для трехобмоточных трансформаторов активные и индуктивные сопротивления вторичных обмоток растут по мере их удаления от первичной. Поэтому при расположении обмоток на стержне в порядке W_2 – W_1 – W_3 можно допустить $\Delta U_2\%$ = $\Delta U_3\%$. Если же расположение обмоток будет в порядке W_1 – W_2 – W_3, то падение напряжения на второй обмотке следует взять равным 0,9 × $\Delta U_2\%$, на третьей обмотке – 1,1 × $\Delta U_3\%$ по отношению к значениям, указанным в табл. 7. При выборе порядка расположения обмоток следует учитывать заданное расчетное условие (минимум массы или минимум стоимости), учитывая при этом, что провод меньшего диаметра имеет бóльшую стоимость. В связи с этим при расчете на минимум стоимости целесообразно обмотку, имеющую наименьший диаметр, располагать первой на стержне, а при расчете на минимум массы первой на стержне следует разместить обмотку, имеющую максимальный диаметр. При выборе расположения обмоток не следует принимать в рассмотрение обмотку имеющую низкое напряжение, а следовательно, малое число витков, так как такая обмотка не вносит существенного влияния в выполнение заданных расчетных условий.

Эдс одного витка, *в*:

$$E_B' = 4{,}44 \times f \times B_{\text{MAX}} \times Q_{\text{СТРАСЧ}}$$

Предварительное число витков в обмотках трансформатора:

$$W_1' = \frac{E_1}{E_B'} \qquad W_2' = \frac{E_2}{E_B'} \qquad W_3' = \frac{E_3}{E_B'}$$

Если число витков обмотки низшего напряжения W_3 получилось дробным, то его следует округлить до целого числа W_3 и затем произвести перерасчет чисел витков других обмоток, магнитной индукции и *эдс* витка по формулам:

$$E_B = E_B' \times \frac{W_3'}{W_3} \qquad B\text{с}_{\text{РАСЧ}} = B_{\text{MAX}} \times \frac{W_3'}{W_3} \qquad W_1 = W'_1 \times \frac{W_3}{W_3'} \qquad W_2 = W_2' \times \frac{W_3}{W_3'}$$

Напряжения на вторичных обмотках при холостом ходе U_{20} и U_{30}, *в*:

$$U_{20} = E_B \times W_2 \quad U_{30} = E_B \times W_3$$

Определение площади окна сердечника.

Площадь окна сердечника *Fo*, *м*^{2}, необходимая для размещения всех обмоток трансформатора, определяется по формуле:

$$Fo = \frac{q_1 \times W_1 + q_2 \times W_2 + q_3 \times W_3}{k_{\text{ОК}}}$$

где $k_{\text{ОК}}$ – коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой (выбирается по табл. 5).

Выбор сердечника трансформатора.

Эскизы стандартных сердечников приведены на рис. 1. Основные размеры сердечников: h – высота окна, *м*.; c – ширина окна, *м*.; a – ширина стержня, *м*.; b – толщина пакета, *м*. Эти размеры для стандартных сердечников приведены в приложении 2. При выборе сердечника следует учитывать, что форма и размеры его окна оказывают значительное влияние на величину намагничивающего тока, расход стали и меди. Излишняя высота окна сердечника повышает намагничивающий ток и увеличивает расход стали и массу трансформатора, а заниженная – повышает нагрев обмотки.
Размеры выбранного сердечника (как для броневого, так и для стержневого трансформатора) должны удовлетворять следующим основным требованиям:
– площадь поперечного сечения стержня сердечника *Qc*, *м*^{2}, должна быть равна или близка к расчетной, т. е.:

$$Qc = a \times b \approx Q_{\text{СТПОЛН}} \quad (1)$$

площадь окна должна быть достаточной для размещения обмоток, т. е.:

$$h \times c \geq Fo \quad (2)$$

Если сердечник со стандартными размерами пластин или стандартный ленточный сердечник не удается подобрать из числа сердечников, представленных в приложении 2, то проектирование ведется из расчета на не стандартный сердечник. Для этого, приняв оптимальные отношения b/a = 1…2 и h/c = 2…3, определяют размеры магнитопровода, *м*.:

$$b = \sqrt{Q_{\text{СТПОЛН}} \times \frac{b}{a}} \quad h = \sqrt{Fo \times \frac{h}{c}} \quad a = \frac{b}{\frac{b}{a}} \quad c = \frac{h}{\frac{h}{c}}$$

Размеры сердечника округляют до миллиметра и проверяют выполнение соотношений (1) и (2). В случае выбора сердечника, у которого сечение *Qc* отличается от предварительно рассчитанного $Q_{\text{СТПОЛН}}$, необходимо заново произвести перерасчет магнитной индукции в стержне *Bc*, *Тл*, по формуле:

$$Bc = Bc_{\text{РАСЧ}} \times \frac{Q_{\text{СТПОЛН}}}{Qc}$$

Проверка возможности размещения обмоток в окне сердечника.

Для проверки пригодности выбранного ранее сердечника определяется радиальная толщина обмоток трансформатора. Число витков первичной обмотки в одном слое n_1 составит:

$$n_1 = \frac{h - 2 \times h_{\text{ИЗ1}}}{d_{1\text{И}} \times k_{\text{У}1}}$$

где $h_{\text{ИЗ1}}$ – изоляционное расстояние от обмотки до ярма, *м*. (обычно $h_{\text{ИЗ1}}$ = 2…5 *мм*.); $k_{\text{У}1}$ – коэффициент укладки провода в осевом направлении (определяется по кривой на рис. 6).

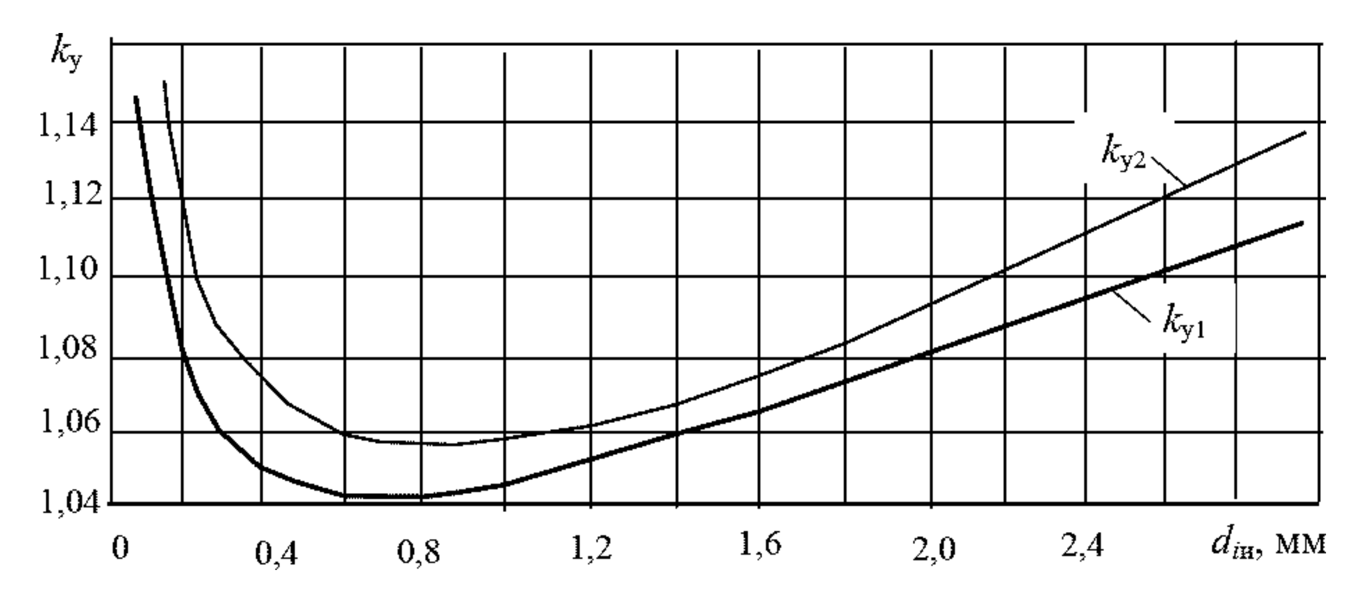


Рис. 6. Зависимость коэффициентов укладки в осевом $k_{\text{У}1}$
и радиальном $k_{\text{У}2}$ направлениях от диаметра провода $d_{i\text{И}}$

Число слоев первичной обмотки m_1 трансформатора броневого типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит:

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1}$$

Полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего целого числа. В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_1/2$. Напряжение между двумя слоями первичной обмотки $U_{\text{С}1}$, *в*, определяется по формуле:

$$U_{\text{С}1} = 2 \times n_1 \times E_B$$

Если напряжение $U_{\text{С}1}$ превышает 50 *в*, то между двумя слоями обмотки следует помещать изоляционные прокладки, толщина которых $\gamma_{\text{МС}1}$ составляет 0,05…0,08 *мм*. Толщина первичной обмотки δ_1, *м*., составит:

$$\delta_1 = k_{\text{У}1} \times m_1 \times d_{1\text{И}} + k_{\text{МС}} \times (m_1 - 1) \times \gamma_{\text{МС}1}$$

где $k_{\text{У}2}$ – коэффициент укладки обмотки в радиальном направлении в зависимости от диаметра провода (определяют по рис. 6); $k_{\text{МС}}$ – коэффициент неплотности межслоевой изоляции, определяется по кривым, приведенным на рис. 7, в зависимости от диаметра провода и толщины изоляции.

Число витков вторичной обмотки в одном слое n_2 составит:

$$n_2 = \frac{h - 2 \times h_{И32}}{d_{2И} \times k_{У1}}$$

где $h_{И32}$ – расстояние от вторичной обмотки до ярма, *м*. (принимается аналогично $h_{И31}$). Число слоев вторичной обмотки m_2 трансформатора броневого типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит:

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2}$$

Полученное значение m_2 также округляется до ближайшего большего целого числа. В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_2/2$. Напряжение между двумя слоями вторичной обмотки $U_{С2}$, *в*, определяется по формуле:

$$U_{C2} = 2 \times n_2 \times E_B$$

Как и для первичной обмотки, в случае если $U_{С2}$ > 50 *в*, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_{МС2}$ = 0,05…0,08 *мм*.

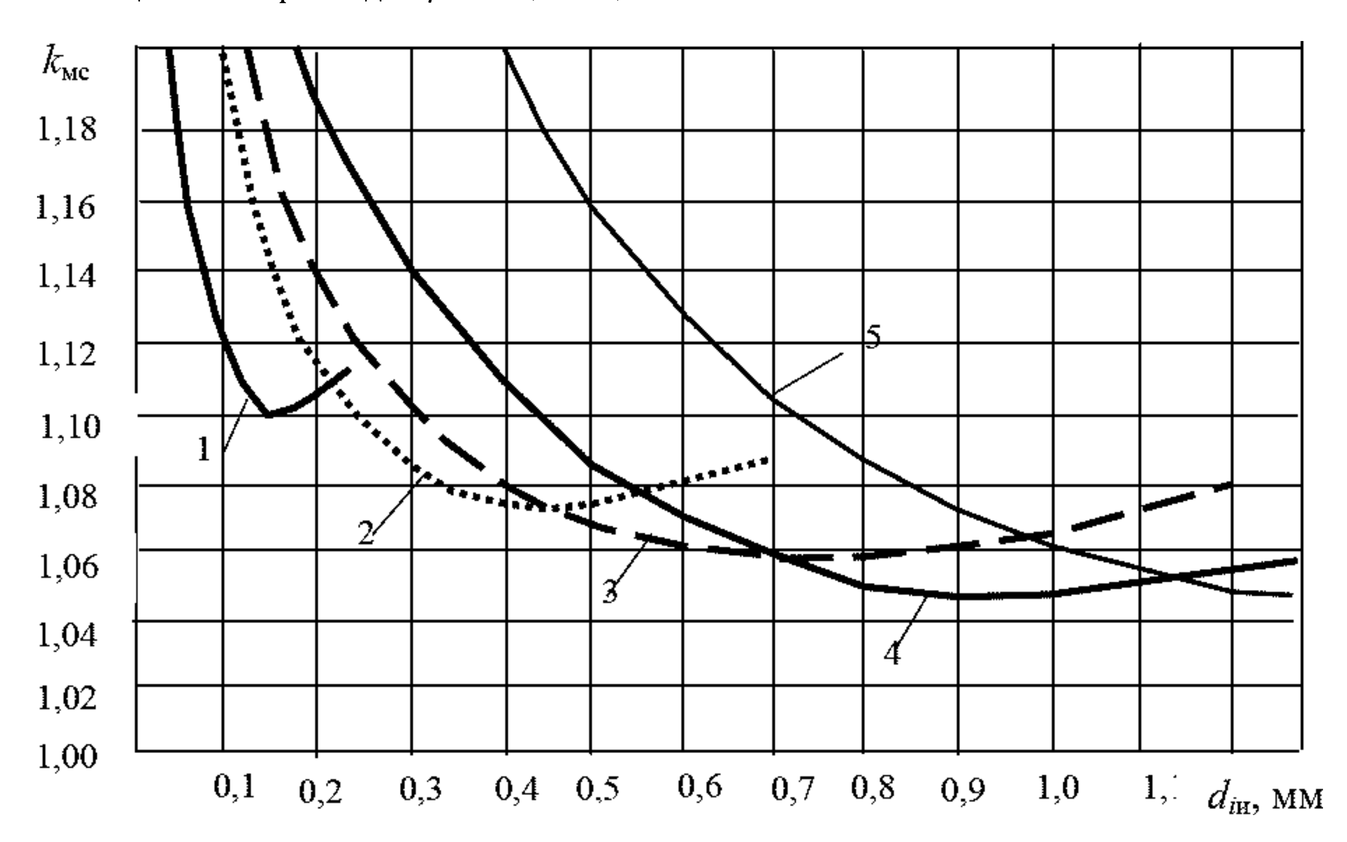


Рис. 7. Зависимость коэффициента неплотности межслоевой изоляции $k_{мс}$ от диаметра изолированного провода $d_{ИІ}$ и толщины изоляции $\gamma_{МСІ}$:
1 – до 0,022 *мм*.; 2 – до 0,05 *мм*.; 3 – до 0,09 *мм*.; 4 – 0,11 *мм*.; 5 – до 0,2 *мм*.

Толщина вторичной обмотки δ_2, *м*., составит:

$$\delta_2 = k_{У1} \times m_2 \times d_{2И} + k_{МС} \times (m_2 - 1) \times \gamma_{МС2}$$

Число витков третьей обмотки в одном слое n_3 составит:

$$n_3 = \frac{h - 2 \times h_{\text{ИЗ3}}}{d_{\text{3И}} \times k_{\text{у1}}}$$

где $h_{\text{ИЗ3}}$ – расстояние от вторичной обмотки до ярма, *м*. (принимается аналогично $h_{\text{ИЗ1}}$). Число слоев вторичной третьей обмотки m_3 трансформатора броневого типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит:

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3}$$

В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_3/2$. Напряжение между двумя слоями третьей обмотки $U_{\text{С3}}$, *в*, определяется по формуле:

$$U_{\text{С3}} = 2 \times n_3 \times E_B$$

Как и для первичной обмотки, в случае если $U_{\text{С3}} > 50$ *в*, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_{\text{МС3}}$ = 0,05…0,08 *мм*. Толщина третьей обмотки δ_3, *м*., составит:

$$\delta_3 = k_{\text{у1}} \times m_3 \times d_{\text{3И}} + k_{\text{МС}} \times (m_3 - 1) \times \gamma_{\text{МС3}}$$

Если трансформатор имеет более трех обмоток, их толщина определяется аналогично. На рис. 8 показаны основные изоляционные расстояния при размещении обмоток. Полный радиальный размер катушки $a_{\text{КАТ}}$, *м*., определяется из выражения:

$$a_{\text{КАТ}} = \varDelta_3 + (h_{\text{ИЗОС}} + \delta_1 + k_{\text{МО}} \times h'_{\text{ИЗМО}} + \delta_2 + k_{\text{МО}} \times h''_{\text{ИЗМО}} + \delta_3 + k_{\text{НО}} \times h_{\text{ИЗН}}) \times k_{\text{В}}$$

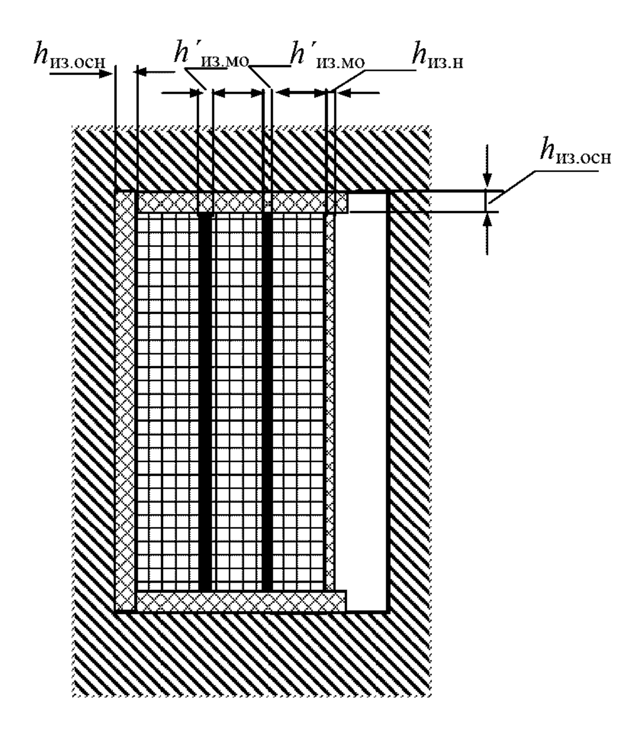


Рис. 8. Изоляционные расстояния при размещении обмоток.

где $\varDelta_3$ – зазор между гильзой (каркасом) и сердечником, *м*. (при расчете принимается 0,5 *мм*.); $h_{\text{ИЗОС}}$ – толщина гильзы (каркаса) с учетом дополнительной изоляции поверх каркаса, *м*.; δ_i – радиальные размеры обмоток, *м*.; $k_{\text{МО}}$ – коэффициент неплотности межобмоточной изоляции (при расчете определяется по рис. 9); $h'_{\text{ИЗМО}}$, $h''_{\text{ИЗМО}}$ – толщина межобмоточной изоляции, *м*.; $k_{\text{НО}}$ – коэффициент неплотности намотки наружной изоляции (принимается 1,7…2); $h_{\text{ИЗН}}$ – толщина наружной изоляции, *м*.; k_B – коэффициент выпучивания в радиальном направлении (учитывается только при выполнении обмотки на гильзе или каркасе из электрокартона), определяется по графикам (рис. 10) в зависимости от диаметра провода с учетом отношения b/a выбранного типоразмера магнитопровода (при выполнении обмотки на штампованном каркасе принимается k_B = 1). Толщина гильзы принимается равной 1…2 *мм*., а толщина каркаса 1,5…3,0 *мм*. (в зависимости от диаметра провода). Поверх гильзы (каркаса) наматывают изоляционную бумагу обеспечивающую лучшую укладку провода и усиливающую изоляцию.

Для этой цели применяют кабельную бумагу К–12 (толщина 0,12 *мм.*) или пропиточную бумагу марки ЭИП–63Б (толщина 0,11 *мм.*) в один слой при величине рабочего напряжения первичной обмотки до 250 *в*, в два слоя при напряжении до 500 *в* и в три слоя при напряжении до 750 *в*.

Толщина изоляции между обмотками определяется в зависимости от величины испытательного напряжения обмотки с наибольшим напряжением. При $U_{\text{исп}}$ до 1000 *в* рекомендуется применять три слоя пропиточной бумаги ЭИП–63Б или два слоя бумаги К–12. При $U_{\text{исп}}$ до 1600 *в* – соответственно четыре слоя бумаги ЭИП–63Б или три слоя К–12; при $U_{\text{исп}}$ до 2200 *в* – пять слоев ЭИП–63Б или четыре слоя К–12; при $U_{\text{исп}}$ до 2700 *в* – шесть слоев ЭИП–63Б или пять слоев К–12; при $U_{\text{исп}}$ до 3500 *в* – восемь слоев ЭИП–63Б или шесть слоев К–12.

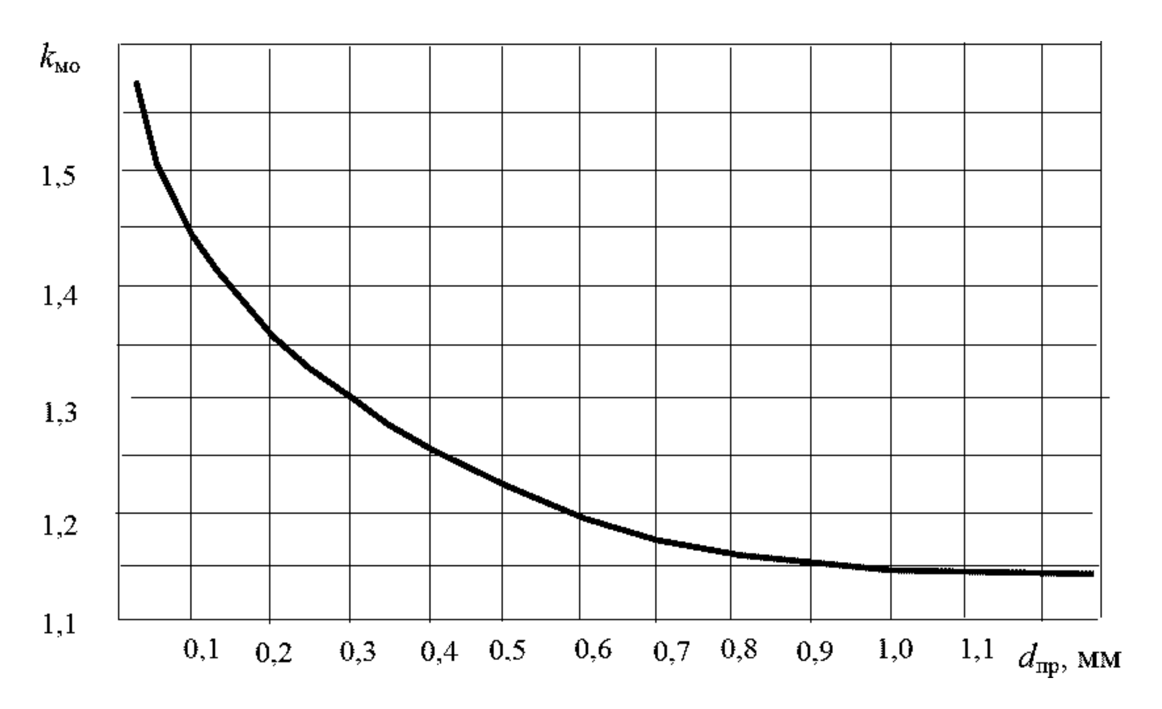


Рис. 9. Зависимость коэффициента неплотности межобмоточной изоляции $k_{\text{МО}}$ от диаметра провода $d_{\text{ПР}}$.

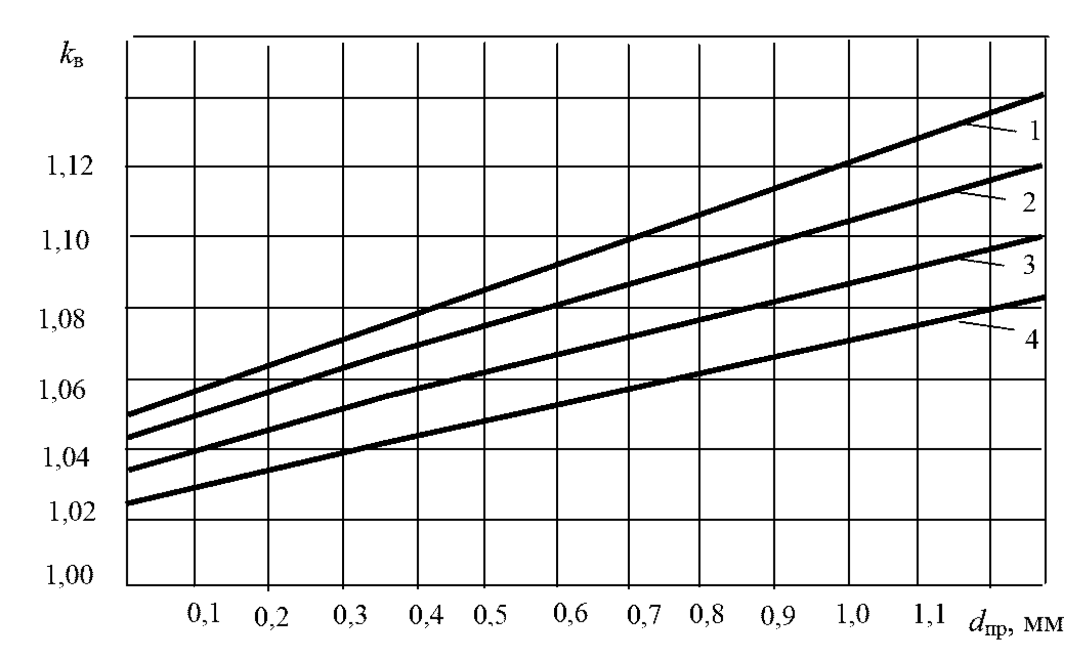


Рис. 10. Зависимость коэффициента выпучивания k_B в радиальном направлении от диаметра провода $d_{\text{ПР}}$ и конструкции гильзы:
1 – b/a = 2,0; 2 – b/a = 1,6; 3 – b/a = 1,25; 4 – b/a = 1,0.

Величина испытательного напряжения определяется в зависимости от амплитудного значения рабочего напряжения по рис. 11. При этом амплитудное значение рабочих напряжений обмоток $U_{ТР}$, *в*, может быть определено из выражения:

$$U_{\text{ТР}} = \sqrt{2} \times U_P$$

где U_P – рабочее напряжение обмоток, *в*.

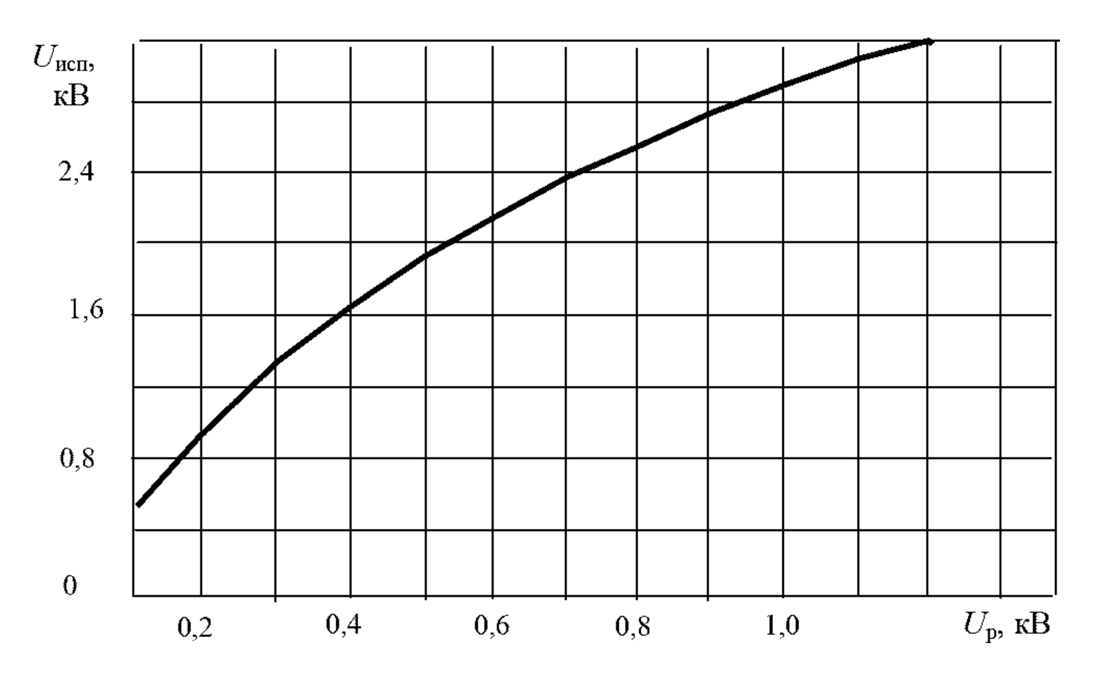


Рис. 11. Зависимость испытательного напряжения
от рабочего напряжения обмотки в амплитудных значениях.

Толщина наружной изоляции $h_{ИЗН}$ выбирается в соответствии с рабочим напряжением последней обмотки. При $U_P < 500$ *в* наружную изоляцию выполняют из двух слоев бумаги ЭИП–63Б или К–12 и одного слоя батистовой ленты толщиной 0,16 *мм*. При $U_P > 500$ *в* наружную изоляцию увеличивают на один слой бумаги на каждые 250 *в*. Величина зазора между катушкой и сердечником ε, *м*., для броневых и стержневых трансформаторов с одной прямоугольной катушкой:

$$\varepsilon = c - a_{\text{КАТ}}$$

Для стержневых трансформаторов с одной круглой катушкой:

$$\varepsilon = c - \varepsilon_0 - a_{\text{КАТ}}$$

где ε_0 – внутренний зазор от стержня до катушки, *м*.

$$\varepsilon_0 = \frac{D_0 - a}{2}$$

где D_0 – диаметр каркаса, *м*. Величина зазора между катушками для двухкатушечного стержневого трансформатора ε, *м*:

$$\varepsilon = c - 2 \times a_{\text{КАТ}}$$

Для нормальной укладки катушки в окне магнитопровода необходимо, чтобы величина зазора ε лежала в пределах 0,5…1,0 *мм*. Если полученный зазор меньше указанного, то необходимо уточнить значение $k_{ОК}$, увеличить площадь окна магнитопровода и пересчитать размеры катушки.

Определение средней длины витка обмоток.

Для прямоугольных катушек средние длины витков соответствующих обмоток $l_{\text{СРВ}i}$, *м.*, определяются по следующим формулам (рис. 12):

$$l_{\text{СРВ1}} = 2 \times (a_{\text{К}} + b_{\text{К}}) + 2 \times \pi \times r_1 \qquad l_{\text{СРВ2}} = 2 \times (a_{\text{К}} + b_{\text{К}}) + 2 \times \pi \times r_2$$

$$l_{\text{СРВ3}} = 2 \times (a_{\text{К}} + b_{\text{К}}) + 2 \times \pi \times r_3$$

где $a_{\text{К}}$, $b_{\text{К}}$ – наружные размеры каркаса или гильзы, *м.*; r_1, r_2, r_3 – средние радиусы закруглений соответствующих обмоток, *м*.

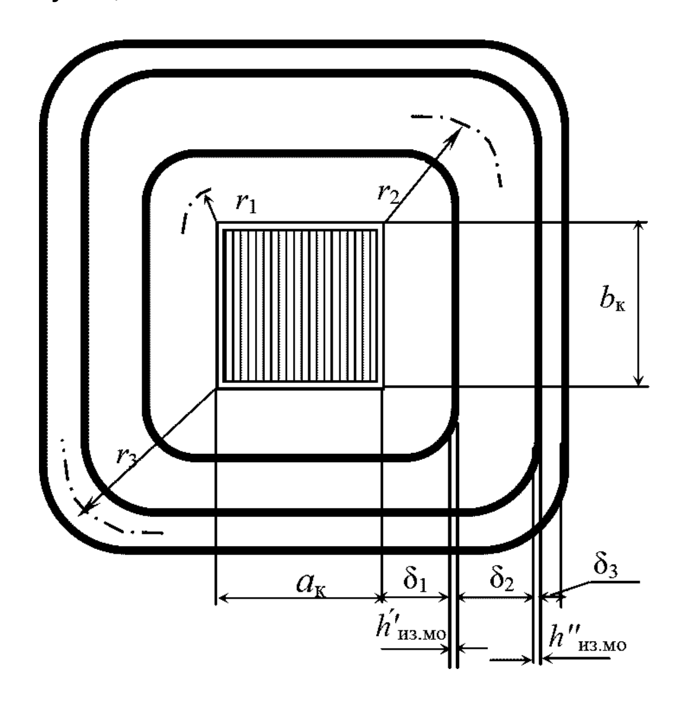


Рис. 12. К определению средней длины витка обмоток.

Наружные размеры каркаса (гильзы) вычисляются по формулам:

$$a_{\text{К}} = a + 2 \times \Delta_3 + 2 \times h_{\text{ИЗОС}} \times k_B \quad b_{\text{К}} = b + 2 \times \Delta_3 + 2 \times h_{\text{ИЗОС}} \times k_B$$

Средние радиусы закруглений обмоток для случая, когда они намотаны на катушке в порядке первая – вторая – третья можно определить следующим образом:

$$r_1 = \frac{\delta_1}{2} \times k_B \qquad r_2 = \left(\delta_1 + h'_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \frac{\delta_2}{2}\right) \times k_B$$

$$r_3 = \left(\delta_1 + h'_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \delta_2 + h''_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \frac{\delta_3}{2}\right) \times k_B$$

При расположении обмоток в последовательности вторая – первая – третья значения r_1 и r_2, *м.*, определяются по формулам:

$$r_1 = \left(\delta_2 + h'_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \frac{\delta_1}{2}\right) \times k_B \qquad r_2 = \frac{\delta_2}{2} \times k_B$$

Для круглых катушек при расположении обмоток в последовательности первая – вторая – третья значения $l_{\text{СРВ}i}$, *м.*, вычисляются по следующим формулам:

$$l_{\text{СРВ}i} = \pi \times \left(a \times \sqrt{2} + 2 \times \Delta_3 + 2 \times h_{\text{ИЗОС}} + \delta_1\right)$$
$$l_{\text{СРВ2}} = \pi \times \left(a \times \sqrt{2} + 2 \times \Delta_3 + 2 \times h_{\text{ИЗОС}} + 2 \times \delta_1 + 2 \times h'_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \delta_2\right)$$
$$l_{\text{СРВ3}} = \pi \times \left[a \times \sqrt{2} + 2 \times (\Delta_3 + h_{\text{ИЗОС}} + \delta_1 + h'_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}} + \delta_2 \times h''_{\text{ИЗМО}} \times k_{\text{МО}}) + \delta_3\right]$$

Расчет массы меди обмоток.

Масса меди обмоток G_{MI}, *кг.*, определяется по формуле:

$$G_{\text{М}i} = 8900 \times W_i \times q_i \times l_{\text{СРВ}i}$$

где W_i – число витков соответствующей обмотки (i = 1, 2, 3); q_i – поперечное сечение проводников соответствующей обмотки, $м^2$.; i – номер соответствующей обмотки. Суммарная масса обмоток трансформатора $G_{\text{М}}$, *кг.*:

$$G_{\text{М}} = G_{\text{М1}} + G_{\text{М2}} + G_{\text{М3}}$$

где $G_{\text{М1}}$, $G_{\text{М2}}$, $G_{\text{М3}}$ – массы меди отдельных обмоток, *кг.*

Определение массы стали.

Масса стали трансформатора $G_{\text{СТ}}$, *кг.*, определяется по формуле:

$$G_{\text{СТ}} = \gamma_{\text{СТ}} \times V_{\text{СТ}} = \gamma_{\text{СТ}} \times l_{\text{СТ}} \times Qc \times k_{\text{СТ}}$$

где $\gamma_{\text{СТ}}$ = 7800 – удельный вес стали, $кг/м^3$.; $V_{\text{СТ}}$ – объем стали, $м^3$.; $l_{\text{СТ}}$ – средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике, *м*. (определяется по формулам, приведенным в табл. 8). После определения массы меди обмоток и стали сердечника по отношению $\alpha = G_{\text{СТ}}/G_{\text{М}}$ проверяется выполнение заданного условия расчета трансформатора (на минимум стоимости или минимум массы). При расчете на минимум стоимости α = 4…6, а при расчете на минимум массы трансформатора α = 2…3.
Если заданное условие расчета не выполнено, необходимо сначала внимательно проверить правильность расчетов. При отсутствии ошибок в расчете, значениях α меньше допустимого и плотностях тока в обмотках, лежащих в пределах рекомендуемых величин, размеры сердечника и обмоток можно не изменять. В том же случае, когда величина получается больше рекомендуемых значений, можно изменить размеры сердечника в меньшую сторону и проверить возможность размещения обмоток в окне нового сердечника, выбрав минимально допустимые размеры изоляционных прокладок между обмотками и отдельными слоями обмоток. Если окажется, что обмотки не размещаются в окне сердечника, следует вернуться к первоначальному сердечнику, но уменьшить толщину пакета b до значения, при котором магнитная индукция не будет превышать максимально допустимую. В этом случае будет необходимо уточнить вес меди обмоток и стали. Для стержневого трансформатора при расчете на минимум массы, если α получится больше трех, следует уменьшить высоту и увеличить ширину окна сердечника, взяв отношение высоты к ширине меньше трех, но не меньше двух.

Определение потерь в стали и намагничивающего тока.

Для сердечников из сталей 1512, 1521, 3411 и 3412 потери в стали $P_{\text{СТ}}$, *Вт*, определяются по формуле:

$$P_{\text{СТ}} = P_{\text{УД}} \times G_{\text{СТ}}$$

где $P_{\text{УД}}$ – удельные потери, *Вт/кг*.
Величина удельных потерь в сердечнике зависит от значения магнитной индукции Bc, марки стали, толщины листа, частоты сети и типа сердечника (рис. 13, 14).

Таблица 8. Выбор основных расчетных формул для определения некоторых величин.

наименование параметра	броневой трансформатор		стержневой двухкатушечный трансформатор	
	пластинчатый	ленточный	пластинчатый	ленточный
длина средней магнитной линии, $l_{СТ}$, *м.*	$2 \times (h + c + a)$	$2 \times \left(h + c + \frac{\pi \times a}{4}\right)$	$2 \times (h + c + 2 \times a)$	$2 \times \left(h + c + \frac{\pi \times a}{2}\right)$
средняя длина витков катушки $l_{ВСР}$, *м.*	$2 \times (a + b + 2 \times c)$		$2 \times (a + b + c)$	
открытая поверхность охлаждения сердечника, $Q_{СЕРД}$, *м*^{2}.	$2 \times (a + b) \times$ $\times (a + 2c + h)$ $+ 4a \times (b + \frac{a}{2})$	$2 \times (a + b) \times$ $\times (a + 2c + h) +$ $+\pi a \times (b + \frac{a}{2})$	$2c \times (2a + b) +$ $+8a \times (a + b)$	$2c \times (2a + b) +$ $+2\pi a \times (a + b)$
открытая поверхность охлаждения катушки, $Q_{ОБМ.}$, *м.*	$2h \times (a \times 4c) + 2c \times l_{ВСР}$		$2h \times (2a + b + 3c) + 2c \times l_{ВСР}$	

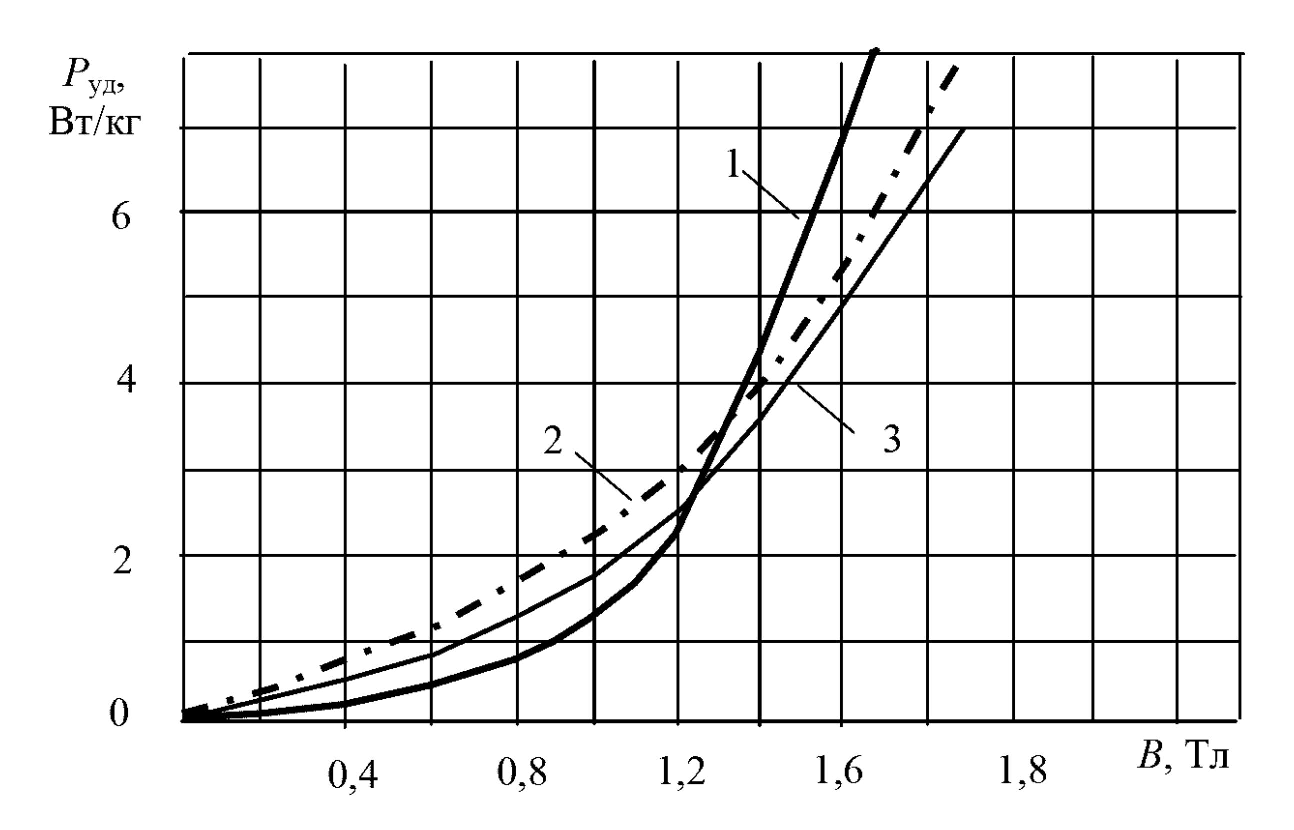


Рис. 13. Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей толщиной 0,35 *мм*. при частоте 50 *гц*.:
1 – броневые сердечники из стали 1512 и 1521;
2 – стержневые сердечники из стали 3411 и 3412;
3 – броневые сердечники из стали 3411 и 3412.

Активная составляющая намагничивающего тока $I_{0А}$, *А*:

$$I_{0А} = \frac{P_{СТ}}{E_1}$$

Реактивная составляющая намагничивающего тока I_{0P}, *A*, для магнитопроводов ТММ может быть определена по формуле:

$$I_{0\text{р}} = \frac{Hс \times l_{\text{СТ}} + 0{,}8 \times Bс \times n \times \delta э \times 10^6}{\sqrt{2} \times W_1}$$

где *Hс* – напряженность поля в стали, определяемая для индукции *Bс* по кривым намагничивания (рис. 15), *А/м.*; *n* – число зазоров (стыков) на пути силовой линии (для стержневых и броневых трансформаторов рекомендуется выбирать конструкцию сердечника с числом стыков *n* = 2); *δэ* – величина эквивалентного воздушного зазора в стыках сердечника трансформатора, *м.* (для шихтованных сердечников *δэ* = 0,02…0,04 *мм.* и для ленточных разрезных *δэ* = 0,015…0,03 *мм.*).

Ток холостого хода I_{10}, *A*:

$$I_{10} = \sqrt{I_{0\text{A}}^2 + I_{0\text{P}}^2}$$

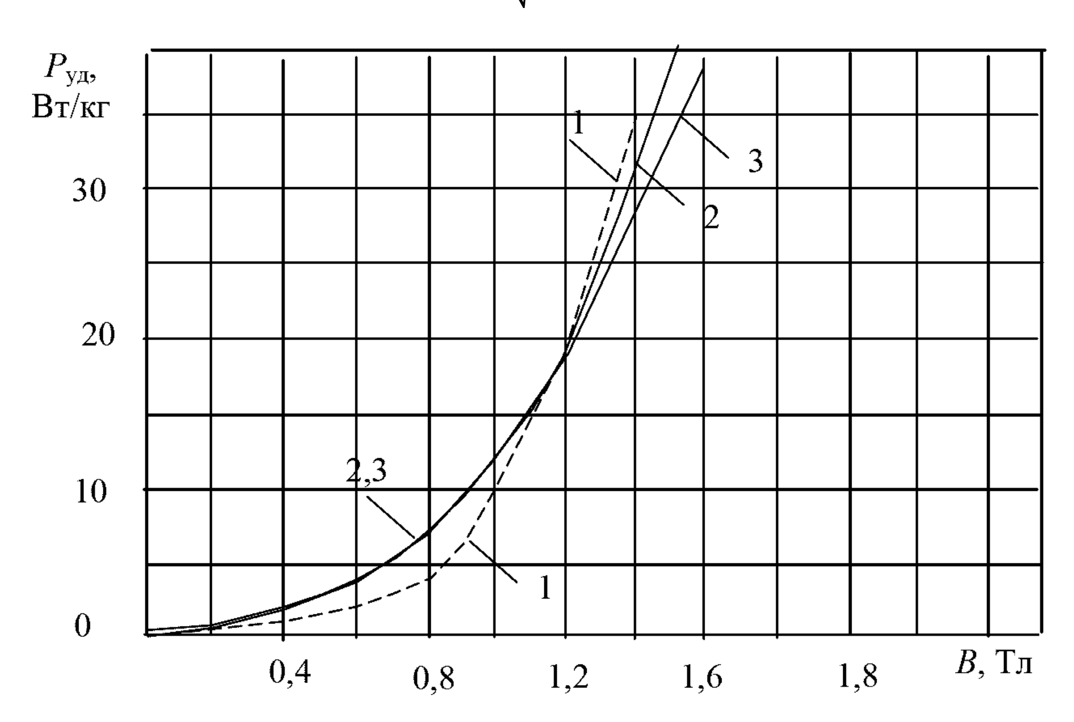


Рис. 14. Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей при частоте 400 *гц*:
1 – броневые сердечники из стали 1512 и 1521;
2 – стержневые сердечники из стали 3411 и 3412;
3 – броневые сердечники из стали 3411 и 3412.

Ток первичной обмотки при номинальной нагрузке I_1, *A*:

$$I_1 = \sqrt{I_{1\text{A}}^2 + I_{1\text{P}}^2}$$

где I_{1A}, I_{1P} – соответственно активная и реактивная составляющие тока первичной обмотки при номинальной нагрузке, *A*.

Активную и реактивную составляющие тока можно определить по следующим формулам:

$$I_{1\text{A}} = I_{0\text{A}} + I'_{2\text{A}} + I'_{3\text{A}} \quad I_{1\text{P}} = I_{0\text{P}} + I'_{2\text{P}} + I'_{3\text{P}}$$

где $I'_{2А}, I'_{3А}, I'_{2Р}, I'_{3Р}$ – приведенные значения активной и реактивной составляющих токов соответствующих вторичных обмоток, *А*. Приведенные значения активной и реактивной составляющих токов вторичных обмоток можно определить по следующим формулам:

$$I'_{2А} = \frac{S_2 \times cos\varphi_2}{U_2} \times \frac{W_2}{W_1} \qquad I'_{3А} = \frac{S_3 \times cos\varphi_3}{U_3} \times \frac{W_3}{W_1}$$

$$I'_{2Р} = \frac{S_2 \times cos\varphi_2}{U_2} \times \frac{W_2}{W_1} \qquad I'_{3Р} = \frac{S_3 \times cos\varphi_3}{U_3} \times \frac{W_3}{W_1}$$

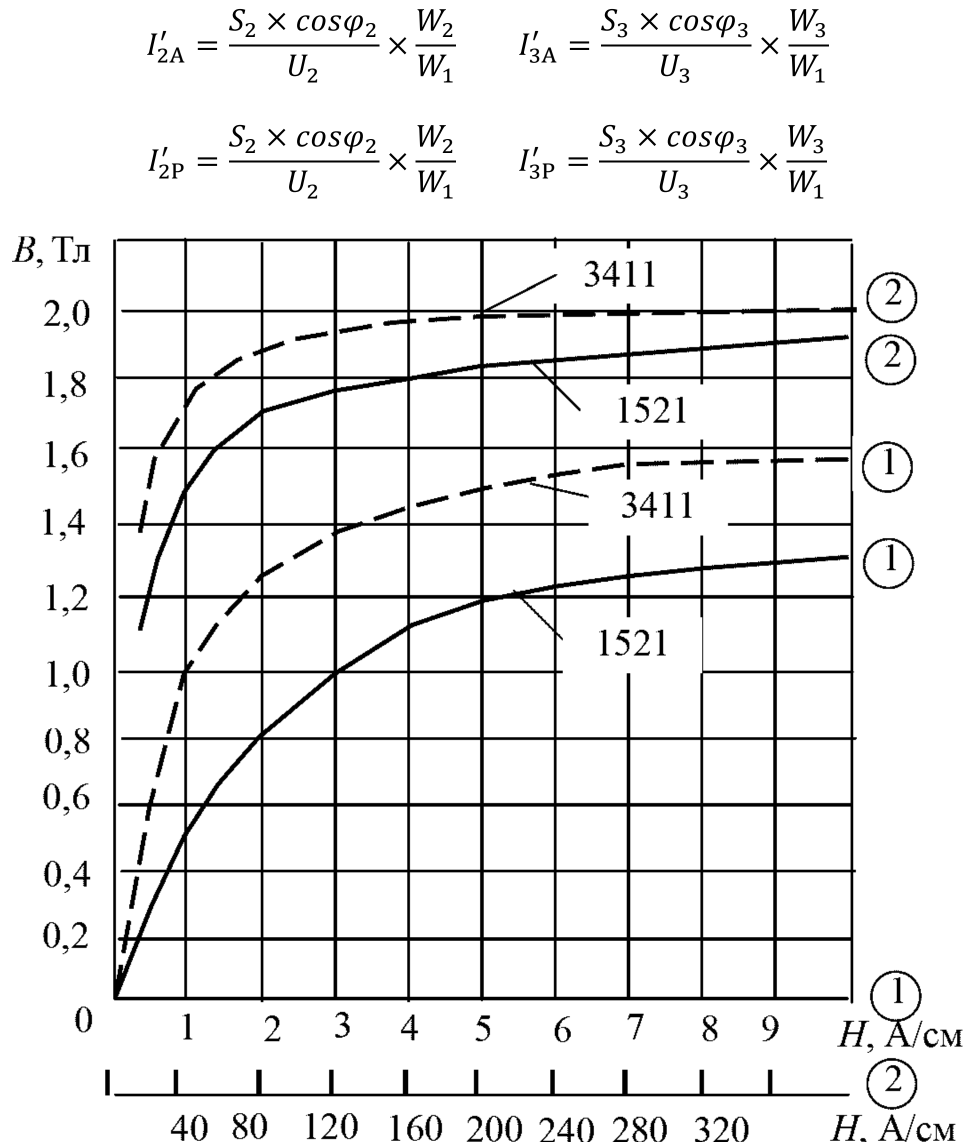


Рис. 15. Характеристики намагничивания электротехнических сталей марок 1521 и 3411.

Относительное значение тока холостого хода I^*_{10} в относительных единицах (далее – о. е.):

$$I^*_{10} = \frac{I_{10}}{I_1}$$

Если величина относительного тока холостого хода при частоте 50 *гц* лежит в пределах 0,3…0,5, при частоте 400 *гц* – в пределах 0,1…0,2, то выбор магнитопровода на этой стадии расчета можно считать оконченным.

Если значение относительного тока холостого хода больше 0,5 (при 50 *гц*) или больше 0,2 (при 400 *гц*), то следует уменьшить магнитную индукцию. Если значение относительного тока холостого хода меньше 0,3 при частоте 50 *гц* или меньше 0,1 при частоте 400 *гц*, то индукцию в магнитопроводе можно увеличить если это допустимо по условиям нагрева. Расчет следует повторять до тех пор, пока относительный ток холостого хода будет лежать в указанных пределах.

Коэффициент мощности:

$$cos\varphi_1 = \frac{I_{1A}}{I_1}$$

Определение потерь в меди обмоток трансформатора.

Потери в меди обмоток P_{Mi}, *Вт*, определяются по формуле:

$$P_{MI} = kt \times j_i^2 \times G_{Mi} \times 10^{-12}$$

где kt – коэффициент, зависящий от температуры провода; j_i – плотность тока в i – й обмотке (i = 1, 2, 3), $A/м^2$; G_{Mi} – масса меди соответствующих обмоток, *кг*. Значения коэффициента kt при различных температурах провода приведены в табл. 9.

Таблица 9. Значения коэффициента kt при различных температурах провода.

температура провода, $t°C$	90	105	120	130	155	180	200
значение коэффициента, kt	2,52	2,65	2,76	2,84	3,02	3,23	3,38

Суммарные потери в меди обмоток P_M, *Вт*:

$$P_M = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3}$$

После определения потерь в стали и меди необходимо проверить значение β:

$$\beta = \frac{P_M}{P_{CT}}$$

Для хорошо спроектированного трансформатора отношение β должно находиться в пределах 1,25…2 (в некоторых случаях до 2,5) при частоте 50 *гц* и в пределах 0,9…1,5 при частоте 400 *гц*.

Определение активных сопротивлений обмоток.

Активные сопротивления обмоток при температуре 105°C r_{105i}, *Ом*:

$$r_{105i} = \rho \times l_{CPBi} \times \frac{W_i}{q_i}$$

где ρ – удельное сопротивление медного провода (при t = 105°C, $\rho = 2{,}35 \times 10^{-8}$ *Ом×м.*); l_{CPBi} – средняя длина витка i – й обмотки, *м.*; q_i – сечение проводника соответствующей обмотки, $м^2$; W_i – число витков i – й обмотки. При температуре окружающей среды 20°C активное сопротивление обмотки r_{20}, *Ом*, можно вычислить по формуле:

$$r_{20} = \frac{1{,}75 \times r_{105}}{2{,}35}$$

Сопротивления вторичных обмоток, приведенные к первичной, r'_2 и r'_3, *Ом*, определим по формулам:

$$r_2' = r_2 \times \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 \qquad r_3' = r_3 \times \left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2$$

где r_2 и r_3 – активные сопротивления соответствующих обмоток при температуре 105°C, *Ом*.

Определение индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток.

Индуктивное сопротивление рассеяния i – й обмотки x^*_i, о. е.:

$$x_i^* = \frac{7{,}9 \times W_1 \times I_1 \times f \times 10^{-6}}{E_B} \times \frac{S_{PI}}{h_К}$$

где S_{PI} – площадь канала рассеяния i – й обмотки (i = 1, 2, 3), $м^2$; $h_К$ – высота катушки, *м*. Значение высоты катушки можно вычислить по формуле:

$$h_К = h - 2 \times h_{ИЗ}$$

При размещении обмоток в порядке: первая – вторая – третья (рис. 16, *а*) площади каналов рассеяния определяются следующим образом:

$$S_{P1} = \frac{\delta_1}{3} \times l_{СРВ1} + \frac{k_В \times k_{МО12} \times h_{ИЗМО12}}{2} \times l_{12}$$

$$S_{P2} = \frac{k_B \times k_{МО12} \times h_{ИЗМО12}}{2} \times \frac{\delta_2}{3} \times l_{СРВ2} \times (1 + I_2^* + I_3^{*2}) + \frac{k_B \times k_{МО23} \times h_{ИЗМО23}}{2} \times l_{23} \times I_3^{*2}$$

$$S_{P3} = \frac{k_B \times k_{МО23} \times h_{ИЗМО23}}{2} \times l_{23} \times I_3^{*2} + \frac{\delta_3}{3} \times l_{СРВ3} \times I_3^{*2}$$

где $h_{ИЗМО12}$, $h_{ИЗМО23}$ – толщины изоляции между соответствующими обмотками, *м*. (зависят от испытательного напряжения); l_{12}, l_{23} – средние длины витков двух соответствующих обмоток, *м*.; I^*_2, I^*_3 – относительные значения токов вторичных обмоток, о. е. Значения l_{12} и l_{23}, *м*., определяются выражениями:

$$l_{12} \approx \frac{l_{СРВ1} + l_{СРВ2}}{2} \qquad l_{23} \approx \frac{l_{СРВ2} + l_{СРВ3}}{2}$$

Относительные значения токов вторичных обмоток I^*_2, I^*_3, о. е.:

$$I_2^* = \frac{I_2'}{I_1} \qquad I_3^* = \frac{I_3'}{I_1}$$

где I'_2 , I'_3 – приведенные токи вторичных обмоток, *А*.
Значения приведенных токов вторичных обмоток I'_2 и I'_3, *А*, определяются по формулам:

$$I_2' = I_2 \times \frac{W_2}{W_1} \qquad I_3' = I_3 \times \frac{W_3}{W_1}$$

При размещении обмоток в порядке: вторая – первая – третья (рис. 16, *б*) площади каналов рассеяния, $м^2$, определяются по формулам:

$$S_{P1} = I_2^* \times l_{12} \times \left(I_2^* \times \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_B \times k_{МО12} \times h_{ИЗМО12}}{2}\right) + I_3^* \times l_{13} \times \left(I_3^* \times \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_B \times k_{МО13} \times h_{ИЗМО13}}{2}\right)$$

$$s_{P2} = \frac{k_B \times k_{МО12} \times h_{ИЗМО12}}{2} \times l_{12} + \frac{\delta_2}{3} \times l_{СРВ2}$$

$$s_{P3} = \frac{\delta_3}{3} \times l_{СРВ3} + \frac{k_B \times k_{МО13} \times h_{ИЗМО13}}{2} \times l_{13}$$

где l_{13} – средняя длина витков первой и третьей обмоток, *м*.

Значение l_{13}, *м.*, можно определить по формуле:

$$l_{13} = \frac{l_{\text{СРВ1}} + l_{\text{СРВ3}}}{2}$$

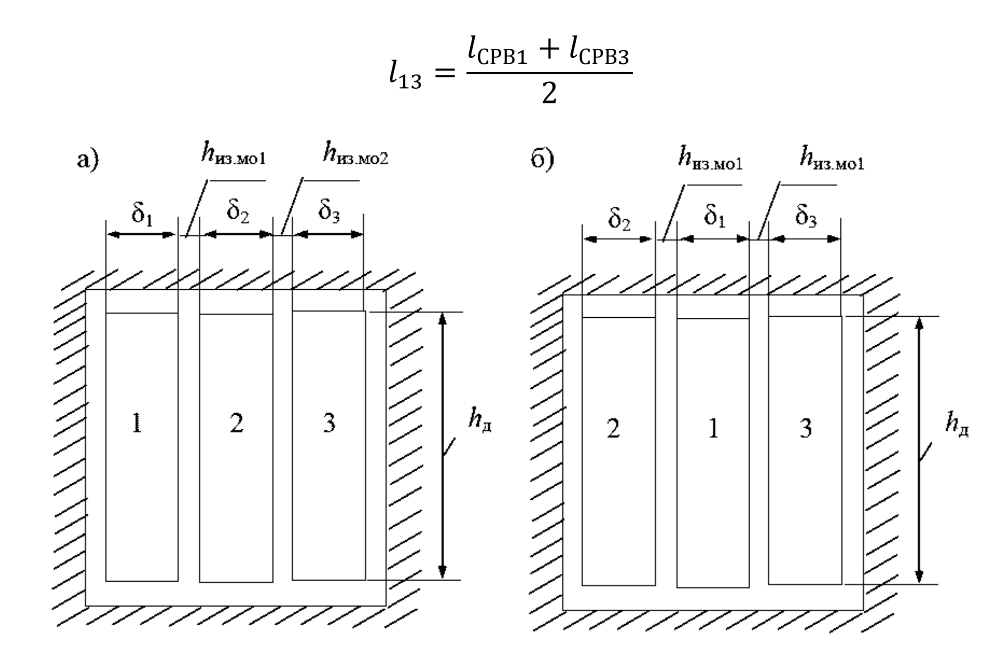


Рис. 16. К определению индуктивных сопротивлений рассеяния.

Падения напряжений на обмотках при номинальной нагрузке.

Активные и реактивные составляющие падений напряжений на обмотках при номинальной нагрузке, о. е., вычисляются по формулам:

$$\Delta U^*_{\text{А1}} = \frac{r_1 \times I_1}{U_1} \qquad \Delta U^*_{\text{А2}} = \frac{r_2 \times I_1}{U_1} \qquad \Delta U^*_{\text{А3}} = \frac{r_3 \times I_1}{U_1}$$

$$\Delta U^*_{\text{Р1}} = x^*_1 \qquad \Delta U^*_{\text{Р2}} = x^*_2 \qquad \Delta U^*_{\text{Р3}} = x^*_3$$

где r_1, r_2, r_3 – сопротивления обмоток при температуре 105°*C*, *Ом*.
Полные падения напряжения на вторичных обмотках при номинальной нагрузке трансформатора, о. е.:

$$\Delta U^*_{12} = \Delta U^*_{A1} \times cos\varphi_1 + \Delta U^*_{P1} \times sin\varphi_1 + \frac{I_2 \times W_2}{I_1 \times W_1} \times (\Delta U^*_{A2} \times cos\varphi_2 + \Delta U^*_{P2} \times sin\varphi_2)$$

$$\Delta U^*_{13} = \Delta U^*_{A1} \times cos\varphi_1 + \Delta U^*_{P1} \times sin\varphi_1 + \frac{I_3 \times W_3}{I_1 \times W_1} \times (\Delta U^*_{A3} \times cos\varphi_2 + \Delta U^*_{P3} \times sin\varphi_2)$$

Напряжения на вторичных обмотках.

Напряжения на вторичных обмотках $U_{\text{2РАСЧ}}$, $U_{\text{3РАСЧ}}$, *в*:

$$U_{\text{2РАСЧ}} = \frac{W_2}{W_1} \times U_1 \times (1 - \Delta U^*_{12}) \qquad U_{\text{3РАСЧ}} = \frac{W_3}{W_1} \times U_1 \times (1 - \Delta U^*_{13})$$

Относительная погрешность, т. е. относительная разность заданных и полученных значений напряжений на вторичных обмотках, выраженная в процентах, определяется по формулам:

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2 - U_{\text{2РАСЧ}}}{U_2} \times 100\% \qquad \varepsilon_3 = \frac{U_3 - U_{\text{3РАСЧ}}}{U_3} \times 100\%$$

Если ε_2 или ε_3 более 2…8 %, то необходимо уточнить числа витков W_2 или W_3, соответственно оставив число витков W_1 не изменным. После этого с учетом новых значений W_2 и W_3 необходимо внести уточнения в расчеты.

Коэффициент полезного действия трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора может быть определен при номинальной нагрузке по формуле:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}}$$

где P – суммарная активная мощность вторичных обмоток трансформатора, *Вт*.
Суммарную активную мощность вторичных обмоток трансформатора P, *Вт*, можно определить по формуле:

$$P = U_{2\text{РАСЧ}} \times I_2 \times cos\varphi_2 + U_{3\text{РАСЧ}} \times I_3 \times cos\varphi_3$$

Проверка трансформатора на нагрев.

В маломощных трансформаторах отдача тепла в окружающее пространство осуществляется с открытых частей обмоток и сердечника. Так как между сердечником и обмотками трансформатора имеется достаточный тепловой обмен, то превышение температуры наиболее нагретой части над температурой окружающей среды $\Delta\theta_{\text{ТР}}$, *°C* (которое обычно лимитирует мощность трансформатора), можно определить по формуле:

$$\Delta\theta_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}}{k\tau \times (Q_{\text{ОБМ}} + Q_{\text{СЕРД}})} + \Delta\theta$$

где $k\tau$ – средний коэффициент теплоотдачи с охлаждающей поверхности трансформатора, *Вт/м²×°C*, (при расчете приближенно можно принять равным 13 *Вт/м²×°C*); $Q_{\text{СЕРД}}$, $Q_{\text{ОБМ}}$ – площади открытых поверхностей сердечника и обмоток трансформатора соответственно, *м²* (вычисляются по формулам, приведенным в табл. 8); $\Delta\theta$ – перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, *°C* (для пропитанных лаком обмоток приближенно может быть принят равным 10…15*°C*). Площадь открытой поверхности круглой катушки, *м.*:

$$Q_{\text{ОБМ}} \approx \pi \times D_{\text{НАР}} \times h_{\text{к}}$$

где $D_{\text{НАР}}$ – наружный диаметр катушки, *м*.
Величину $D_{\text{НАР}}$, *м.*, можно определить по следующей формуле:

$$D_{\text{НАР}} = a + 2 \times a_{\text{КАТ}}$$

Сумма превышения температуры $\Delta\theta_{\text{ТР}}$ и температуры окружающей среды θ_0 не должна быть больше допустимой величины в соответствии с выбранным при расчете классом нагревостойкости изоляции, т. е.:

$$\theta_{\text{ТР}} = \Delta\theta_{\text{ТР}} + \theta_0 \le \theta_{\text{ДОП}}$$

Например, для изоляции класса нагревостойкости А – $\theta_{\text{ТР}} \le 105$*°C*, а для изоляции класса нагревостойкости В – $\theta_{\text{ТР}} \le 130$*°C*.

Выбор проводов для выводов обмоток.

Для обмоток, выполненных проводом диаметром менее 0,2…0,35 *мм*., выводные концы и отводы выполняют гибким монтажным проводом сечением 0,05…0,2 $мм^2$.
При более толстых проводах выводы и отводы делают самим проводом, причем при диаметрах более 0,9…1,0 *мм*. отводы выполняют петлей. При диаметрах проводов около 2 *мм*. снова переходят к монтажному проводу. Наиболее часто выводы обмоток выполняют проводами марки МГШДО при рабочем напряжении до 127 *в*, марки МГШДЛ – при рабочем напряжении до 220 *в*, марки МГТФЛ – при рабочем напряжении до 500 *в* и марок ПВТФ–2 и ПВТФ–5 – при рабочем напряжении до 2 *кв*. Выводные концы заключают в изоляционные трубки.

Сводные данные расчета трансформатора.

Основные результаты расчета трансформатора целесообразно оформить в виде формуляра:
Масса стали сердечника, *кг*. – $G_{СТ}$
Удельный расход стали, $кг/кВА$ – $G_{СТ}/S$ (где S – суммарная полная мощность вторичных обмоток трансформатора)
Масса меди обмоток, *кг*. – $G_{М}$
Удельный расход меди, $кг/кВА$ – $G_{М}/S$
Отношение массы стали к массе меди – $G_{СТ}/G_{М}$
Потери в стали сердечника, *Вт* – $P_{СТ}$
Потери в меди обмоток, *Вт* – $P_{М}$
Отношение потерь в меди к потерям в стали – $P_{СТ}/P_{М}$
Кпд при номинальной нагрузке – η
Максимальное превышение температуры обмотки трансформатора над температурой окружающей среды, $°C$ – $\Delta\theta_{ТР}$
Относительный ток холостого хода – I_0/I_1
Относительные изменения напряжения при номинальной нагрузке:
на второй обмотке – ΔU^*_{12}, на третьей обмотке – ΔU^*_{13}
По результатам расчета трансформатора следует составить таблицу обмоточных данных и задание на намотку по образцам, приведенным в приложении 3.

4. Пример расчета трансформатора.

Исходные данные расчета.

Напряжение первичной обмотки U_1, *в*. – 220
Напряжения вторичных обмоток U_2, U_3, *в*. – 300, 18. Частота тока *f*, *гц* – 400
Полные мощности вторичных обмоток S_2, S_3, *ВА* – 120, 50
Коэффициенты мощности $cos\varphi_2$, $cos\varphi_3$ – 0,65, 0,9
Температура окружающей среды θ_0, $°C$ – 30. Расчетное условие – минимум стоимости.

Расчетная мощность трансформатора S_P, *ВА*:

$$S_{Р} = S_2 + S_3 = 120 + 50 = 170$$

Для рассчитываемого трансформатора мощностью выше 100 *ВА* при условии минимума стоимости целесообразно использовать броневой пластинчатый магнитопровод. Для частоты сети 400 *гц* и при условии минимума стоимости выбираем горячекатаную сталь марки 1521 толщиной 0,2 *мм*.

Активная составляющая тока первичной обмотки $I_{1А}$, A:

$$I_{1А} = \frac{S_2 \times cos\varphi_2 + S_3 \times cos\varphi_3}{\eta \times U_1} = \frac{120 \times 0,65 + 50 \times 0,6}{0,95 \times 220} = 0,589$$

где η – предварительный *кпд* трансформатора.
Предварительный ток намагничивания $I\mu$, A:

$$I\mu = (0,35 \dots 0,5) \times I_{1А} = 0,4 \times 0,589 = 0,236$$

Реактивная составляющая тока первичной обмотки $I_{1р}$, A:

$$I_{1Р} = \frac{S_2 \times sin\varphi_2 + S_3 \times sin\varphi_3}{\eta \times U_1} + I\mu = \frac{120 \times 0,76 + 50 \times 0,436}{0,95 \times 220} + 0,236 = 0,777$$

Ток первичной обмотки I_1, A:

$$I_1 = \sqrt{I_{1А}^2 + I_{1Р}^2} = \sqrt{0,589^2 + 0,777^2} = 0.975$$

Ток второй обмотки I_2, A:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{120}{300} = 0,4$$

Ток третьей обмотки I_3, A:

$$I_3 = \frac{S_3}{U_3} = \frac{50}{18} = 2,78$$

Предварительное значение площади поперечного сечения провода первичной обмотки $q_{1ПР}$, $м^2$:

$$q_{1ПР} = \frac{I_1}{j_{СР}} = \frac{0,975}{0,285 \times 10^{-6}} = 0,287 \times 10^{-6}$$

где $j_{СР}$ – средняя плотность тока в обмотках, $A/м^2$.
Предварительное значение площади поперечного сечения провода второй обмотки $q_{2ПР}$, $м^2$:

$$q_{2ПР} = \frac{I_2}{j_{СР}} = \frac{0,4}{3,4 \times 10^{-6}} = 0,118 \times 10^{-6}$$

Предварительное значение площади поперечного сечения провода третьей обмотки $q_{3ПР}$, $м^2$:

$$q_{3ПР} = \frac{I_3}{j_{СР}} = \frac{2,78}{3,4 \times 10^{-6}} = 0,818 \times 10^{-6}$$

Так как трансформатор проектируется по условию минимальной стоимости, то выбираем эмалированный провод марки ПЭЛ, предназначенный для работы при температуре до 105°C. Стандартные сечения проводов соответствующих обмоток:
q_1 = 0,2734 $мм^2$; q_2 = 0,1134 $мм^2$; q_3 = 0,7854 $мм^2$.
Диаметры проводов обмоток без изоляции: d_1 = 0,59 *мм.*; d_2 = 0,38 *мм.*; d_3 = 1,00 *мм.* Диаметры проводов обмоток с изоляцией: $d_{1И}$ = 0,64 *мм.*; $d_{2И}$ = 0,42 *мм.*; $d_{3И}$ = 1,07 *мм.*

Уточненная плотность тока в первичной обмотке j_1, $A/м^2$:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} = \frac{0,975}{0,2734 \times 10^{-6}} = 3,57 \times 10^{-6}$$

Уточненная плотность тока во второй обмотке j_2, $А/м^2$:

$$j_2 = \frac{I_2}{q_2} = \frac{0,4}{0,1134 \times 10^{-6}} = 3,53 \times 10^{-6}$$

Уточненная плотность тока в третьей обмотке j_3, $А/м^2$:

$$j_3 = \frac{I_3}{q_3} = \frac{2,78}{0,7854 \times 10^{-6}} = 3,54 \times 10^{-6}$$

Полная мощность первичной обмотки трансформатора S_1, $ВА$:

$$S_1 = U_1 \times I_1 = 220 \times 0,975 = 214,5$$

Поперечное сечение стержня сердечника (по стали) $Q_{СТРАСЧ}$, $м^2$:

$$Q_{СТРАСЧ} = C \times \sqrt{\frac{\alpha \times S_1}{f \times Bc_{ПРЕД} \times j_{СР}}} = 0,7 \times \sqrt{\frac{4,4 \times 214,5}{400 \times 0,9 \times 3,4 \times 10^{-6}}} = 6,15 \times 10^{-6}$$

где C – постоянный коэффициент; α – отношение массы стали к массе меди; $Bc_{ПРЕД}$ – предварительное значение магнитной индукции, *Тл*.
Полное поперечное сечение стержня $Q_{СТПОЛН}$, $м^2$ (с учетом межлистовой изоляции):

$$Q_{СТПОЛН} = \frac{Q_{СТРАСЧ}}{k_{СТ}} = \frac{6,15 \times 10^{-4}}{0,85} = 7,24 \times 10^{-4}$$

где $k_{СТ}$ – коэффициент заполнения сердечника сталью.
Так как трансформатор должен иметь минимум стоимости, то целесообразно обмотку, имеющую меньшее поперечное сечение провода, располагать ближе к сердечнику. Выбираем следующее расположение обмоток на стержне: вторая – первая – третья.
Эдс в первой обмотке трансформатора E_1, *в*:

$$E_1 = U_1 \times \left(1 - \frac{\Delta U_1\%}{100}\right) = 220 \times \left(1 - \frac{1,3}{100}\right) = 214,1$$

где $\Delta U_1\%$ – падение напряжения в первичной обмотке при нагрузке в процентах от номинального значения напряжения.
Эдс во второй обмотке трансформатора E_2, *в*:

$$E_2 = U_2 \times \left(1 - \frac{\Delta U_2\%}{100}\right) = 300 \times \left(1 - \frac{1,6}{100}\right) = 304,8$$

Эдс в третьей обмотке трансформатора E_3, *в*:

$$E_3 = U_2 \times \left(1 - \frac{\Delta U_3\%}{100}\right) = 18 \times \left(1 - \frac{1,6}{100}\right) = 18,3$$

Предварительная *эдс* одного витка $E_{ВПРЕД}$, *в*:

$$E_{ВПРЕД} = 4,44 \times f \times Bc_{ПРЕД} \times Q_{СТРАСЧ} = 4,44 \times 400 \times 0,9 \times 6,15 \times 10^{-4} = 0,983$$

Предварительное число витков в первичной обмотке $W_{1ПРЕД}$:

$$W_{1ПРЕД} = \frac{E_1}{E_{ВПРЕД}} = \frac{217,1}{0,983} = 221$$

Предварительное число витков второй обмотки $W_{2ПРЕД}$:

$$W_{2ПРЕД} = \frac{E_2}{E_{ВПРЕД}} = \frac{304,8}{0,983} = 310$$

Предварительное число витков в третьей обмотке $W_{3ПРЕД}$:

$$W_{3ПРЕД} = \frac{E_3}{E_{ВПРЕД}} = \frac{18,3}{0,983} = 18,6$$

Принимаем число витков в третьей обмотке трансформатора W_3 = 19.
Уточненная *эдс* одного витка E_B, *в*:

$$E_В = E_{ВПРЕД} \times \frac{W_{3ПРЕД}}{W_3} = 0,983 \times \frac{18,6}{19} = 0,962$$

Уточненная магнитная индукция в стержне, *Тл*:

$$Bc_{РАСЧ} = Bc_{ПРЕД} \times \frac{W_{3ПРЕД}}{W_3} = 0,9 \times \frac{18,6}{19} = 0,881$$

Уточненное число витков первичной обмотки W_1:

$$W_1 = W_{1ПРЕД} \times \frac{W_3}{W_{3ПРЕД}} = 221 \times \frac{19}{18,6} = 226$$

Уточненное число витков вторичной обмотки W_2:

$$W_2 = W_{2ПРЕД} \times \frac{W_3}{W_{3ПРЕД}} = 3100 \times \frac{19}{18,6} = 317$$

Уточненная *эдс* первичной обмотки E_1, *в*:

$$E_1 = E_В \times W_1 = 0,962 \times 226 = 217,4$$

Напряжение на второй обмотке при холостом ходе U_{20}, *в*:

$$U_{20} = E_В \times W_2 = 0,962 \times 317 = 305$$

Напряжение на третьей обмотке при холостом ходе U_{30}, *в*:

$$U_{30} = E_В \times W_3 = 0,962 \times 19 = 18,3$$

Площадь окна сердечника, необходимая для размещения всех обмоток трансформатора Fo_{TP}, *м*^{2}:

$$Fo_{ТР} = \frac{q_1 \times W_1 + q_2 \times W_2 + q_3 \times W_3}{k_{ОК}} =$$

$$= \frac{0,2734 \times 10^{-4} \times 226 + 0,1134 \times 10^{-4} \times 317 + 0,8495 \times 10^{-4} \times 19}{0,25} = 4,56 \times 10^{-4}$$

Предварительные оптимальные отношения b/a = 1,5 и h/c = 3,0.

Толщина пакета сердечника b, *м.*:

$$b = \sqrt{Q_{СТПОЛН} \times \frac{b}{a}} = \sqrt{7,24 \times 10^{-4} \times 1,5} = 33,0 \times 10^{-3}$$

Высота окна сердечника h, $м.$:

$$h = \sqrt{F\text{о}_{\text{ТР}} \times \frac{b}{a}} = \sqrt{4{,}56 \times 10^{-4} \times 3{,}0} = 37{,}0 \times 10^{-3}$$

Ширина стержня a, $м.$:

$$a = \frac{b}{\frac{b}{a}} = \frac{37{,}0 \times 10^{-3}}{1{,}5} = 22{,}0 \times 10^{-3}$$

Ширина окна сердечника c, $м.$:

$$c = \frac{h}{\frac{h}{c}} = \frac{37{,}0 \times 10^{-3}}{3{,}0} = 12{,}3 \times 10^{-3}$$

Выбираем стандартный сердечник типа ШУ 22×33, который имеет следующие размеры (рис. 17):
– ширина стержня a = 22 *мм.*;
– толщина пакета сердечника b = 33 *мм.*;
– высота окна сердечника h = 39 *мм.*;
– ширина окна сердечника c = 14 *мм.*
Площадь поперечного сечения стержня сердечника Qc = 7,26 $см^2$ близка к расчетной QСТПОЛН = 7,24 $см^2$, а площадь окна выбранного сердечника Fо = 5,46 $см^2$ больше необходимого FоТРЕБ = 4,56 $см^2$, что удовлетворят требованиям выбора сердечника.

Уточненная магнитная индукция в стержне магнитопровода Bc, $Тл$:

$$Bc = Bc_{\text{РАСЧ}} = \frac{Q_{\text{СТПОЛН}}}{Qc} = 0{,}881 \times \frac{7{,}24 \times 10^{-4}}{7{,}26 \times 10^{-4}} = 0{,}879$$

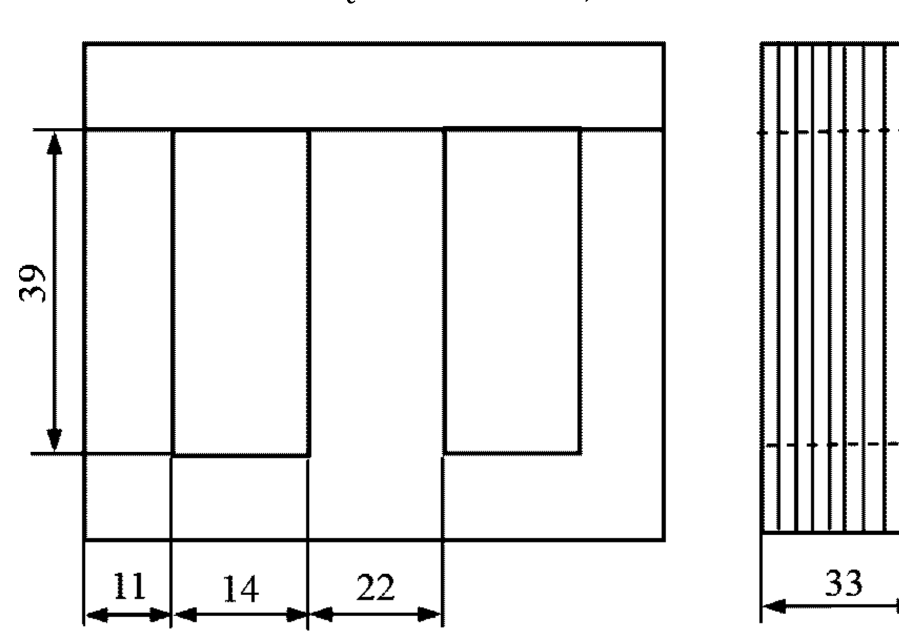


Рис. 17. Броневой пластинчатый магнитопровод трансформатора
с размерами в миллиметрах.

Число витков первичной обмотки в одном слое n_1:

$$n_1 = \frac{h - 2 \times h_{\text{ИЗ}}}{d_{1\text{И}} \times k_{\text{У}11}} = \frac{0{,}039 - 2 \times 0{,}003}{0{,}64 \times 10^{-3} \times 1{,}043} = 49$$

где $h_{ИЗ}$ – изоляционное расстояние от обмотки до ярма, *м.*; $k_{У11}$ – коэффициент укладки провода первичной обмотки в осевом направлении.
Число слоев первичной обмотки трансформатора m_1:

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1} = \frac{226}{49} = 4{,}61$$

Число слоев первичной обмотки округляем до $m_1 = 5$.
Напряжение между двумя слоями первичной обмотки $U_{С1}$, *в*:

$$U_{С1} = 2 \times n_1 \times E_В = 2 \times 49 \times 0{,}962 = 94{,}3$$

Так как напряжение $U_{С1}$ превышает 50 *в*, то между двумя слоями обмотки размещаем изоляционные прокладки с толщиной $\gamma_{МС} = 0{,}08$ *мм*.
Толщина первичной обмотки δ_1, *м.*:

$$\delta_1 = k_{У21} \times m_1 \times d_{1И} \times k_{МС1} \times (m_1 - 1) \times \gamma_{МС} =$$
$$= 1{,}057 \times 5 \times 0{,}64 \times 10^{-3} + 1{,}06 \times (5 - 1) \times 0{,}08 \times 10^{-3} = 3{,}72 \times 10^{-3}$$

где $k_{У21}$ – коэффициент укладки первичной обмотки в радиальном направлении; $k_{мс1}$ – коэффициент неплотности межслоевой изоляции.
Число витков второй обмотки в одном слое n_2:

$$n_2 = \frac{h - 2 \times h_{ИЗ}}{d_{2И} \times k_{У12}} = \frac{0{,}039 - 2 \times 0{,}003}{0{,}42 \times 10^{-3} \times 1{,}05} = 75$$

где $k_{У12}$ – коэффициент укладки провода второй обмотки в осевом направлении.
Число слоев второй обмотки трансформатора m_2:

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{317}{75} = 4{,}23$$

Число слоев второй обмотки округляем до $m_2 = 5$.
Напряжение между двумя слоями второй обмотки $U_{С2}$, *в*:

$$U_{С2} = 2 \times n_2 \times E_В = 2 \times 75 \times 0{,}962 = 144{,}3$$

Так как напряжение $U_{С2}$ превышает 50 *в*, то между двумя слоями обмотки размещаем изоляционные прокладки с толщиной $\gamma_{МС} = 0{,}08$ *мм*.
Толщина второй обмотки δ_2, *м.*:

$$\delta_2 = k_{У22} \times m_2 \times d_{2И} \times k_{МС2} \times (m_2 - 1) \times \gamma_{МС} =$$

$$= 1{,}075 \times 5 \times 0{,}42 \times 10^{-3} + 1{,}075 \times (5 - 1) \times 0{,}08 \times 10^{-3} = 2{,}60 \times 10^{-3}$$

где $k_{У22}$ – коэффициент укладки второй обмотки в радиальном направлении; $k_{МС2}$ – коэффициент неплотности межслоевой изоляции.
Число витков третьей обмотки в одном слое n_3:

$$n_3 = \frac{h - 2 \times h_{ИЗ}}{d_{3И} \times k_{У13}} = \frac{0{,}039 - 2 \times 0{,}003}{1{,}07 \times 10^{-3} \times 1{,}047} = 29$$

где $k_{У13}$ – коэффициент укладки провода третьей обмотки в осевом направлении.
Число слоев третьей обмотки трансформатора m_3:

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3} = \frac{19}{29} = 0{,}655$$

Число слоев третьей обмотки округляем до $m_3 = 1$.

Толщина третьей обмотки δ_3, *м.*:

$$\delta_3 = k_{У23} \times m_3 \times d_{3И} = 1{,}06 \times 1 \times 1{,}07 \times 10^{-3} = 1{,}13 \times 10^{-3}$$

где $k_{У23}$ – коэффициент укладки первичной обмотки в радиальном направлении.

Катушку размещаем на каркасе, изготовленном из электротехнического картона. Толщина каркаса $\Delta_К$ = 2 *мм*. Поверх каркаса наматываем изоляционную кабельную бумагу К–12 толщиной $\Delta_{ИЗ}$ = 0,11 *мм*. при величине рабочего напряжения обмотки 300 *в* (до 500 *в*) в два слоя ($n_{ИЗ}$ = 2). Толщина каркаса с учетом дополнительной изоляции $h_{ИЗОС}$, *м.*:

$$h_{ИЗОС} = \Delta_К + n_{ИЗ} \times \Delta_{ИЗ} = 2 \times 10^{-3} + 2 \times 0{,}11 \times 10^{-3} = 2{,}22 \times 10^{-3}$$

Рабочее напряжение между второй и первой обмотками $U_{Р21}$ = 300 *в*, а между первой и третьей обмотками – $U_{Р13}$ = 220 *в*.
Амплитудное значение рабочего напряжения между второй и первой обмотками $U_{МР21}$, *в*:

$$U_{МР21} = \sqrt{2} \times U_{21} = \sqrt{2} \times 300 = 424$$

Амплитудное значение рабочего напряжения между первой и третьей обмотками $U_{МР13}$, *в*:

$$U_{МР13} = \sqrt{2} \times U_{13} = \sqrt{2} \times 220 = 311$$

Испытательные напряжения: $U_{ИСП21}$ = 1700 *в*; $U_{ИСП13}$ = 1350 *в*.
Между второй и первой обмотками применяем четыре слоя кабельной бумаги К–12, между первой и третьей – три слоя бумаги К–12.

Толщина изоляции между второй и первой обмотками $h_{ИЗМО21}$, *м.*:

$$h_{ИЗМО21} = n_{ИЗМО21} \times \Delta_{из} = 4 \times 0{,}11 \times 10^{-3} = 0{,}44 \times 10^{-3}$$

где $n_{ИЗМО21}$ – число изоляционных слоев между второй и первой обмотками.

Толщина изоляции между первой и третьей обмотками $h_{ИЗМО13}$, *м.*:

$$h_{ИЗМО13} = n_{ИЗМО13} \times \Delta_{ИЗ} = 3 \times 0{,}11 \times 10^{-3} = 0{,}33 \times 10^{-3}$$

где $n_{ИЗМО13}$ – число изоляционных слоев между первой и третьей обмотками.

Наружную изоляцию катушки выполняем из двух слоев кабельной бумаги К–12 и одного слоя батистовой ленты толщиной 0,16 *мм*., наматываемой с половинным перекрытием. Толщина наружной изоляции $h_{ИЗН}$, *м.*:

$$h_{ИЗН} = n_{ИЗН} \times \Delta_{ИЗ} + 2 \times \Delta_{БЛ} = 2{,}011 \times 10^{-3} + 2 \times 0{,}16 \times 10^{-3} = 0{,}54 \times 10^{-3}$$

где $n_{ИЗН}$ – число слоев наружной изоляции; $\Delta_{БЛ}$ – толщина батистовой ленты, *м*.
Полный радиальный размер катушки $a_{КАТ}$, *м.*:

$$a_{КАТ} = \Delta_3 + (h_{ИЗОС} + \delta_1 + k_{МО21} \times h_{ИЗМО21} + \delta_2 + k_{МО13} \times h_{ИЗМО13} + \delta_3 + k_{НО} \times h_{ИЗН}) \times k_B$$

$$a_{КАТ} = 0{,}5 + (2{,}22 \times 10^{-3} + 3{,}72 \times 10^{-3} + 1{,}27 \times 0{,}44 \times 10^{-3} + 2{,}6 \times 10^{-3} +$$

$$+1{,}2 \times 0{,}33 \times 10^{-3} + 1{,}13 \times 10^{-3} + 1{,}85 \times 0{,}54 \times 10^{-3}) \times 1{,}1 = 13{,}3 \times 10^{-3}$$

где $\Delta_З$ – зазор между каркасом и сердечником, *м.*; $k_{МО21}$, $k_{МО13}$ – коэффициенты неплотности межобмоточной изоляции; $k_{НО}$ – коэффициент неплотности намотки наружной изоляции; k_B – коэффициент выпучивания в радиальном направлении.
Зазор между катушкой и сердечником ε, *м.*:

$$\varepsilon = c - a_{КАТ} = 14 \times 10^{-3} - 13{,}3 \times 10^{-3} = 0{,}7 \times 10^{-3}$$

Величина зазора лежит в пределах 0,5…1,0 *мм.*, что допустимо для нормальной укладки катушки в окне магнитопровода. Эскиз катушки с изоляционными расстояниями в миллиметрах показан на рис. 18.

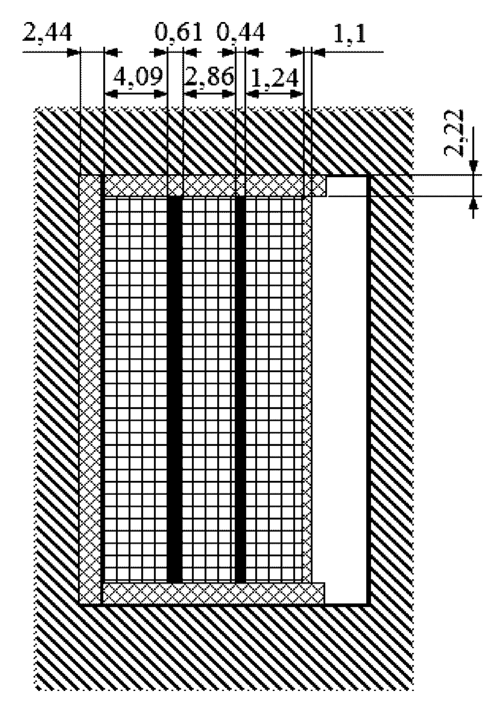


Рис. 18. Катушка трансформатора.

Наружные размеры каркаса $a_К$, $b_К$, *м.*:

$$a_К = a + 2 \times \Delta_З + 2 \times h_{ИЗОС} \times k_в = \\ = 22 \times 10^{-3} + 2 \times 0{,}5 \times 10^{-3} + \\ +2 \times 2{,}22 \times 10^{-3} \times 1{,}1 = 27{,}9 \times 10^{-3}$$

$$b_К = b + 2 \times \Delta_з + 2 \times h_{ИЗОС} \times k_В = \\ = 33 \times 10^{-3} + 2 \times 0{,}5 \times 10^{-3} + \\ +2 \times 2{,}22 \times 10^{-3} \times 1{,}1 = 38{,}9 \times 10^{-3}$$

Средний радиус изгиба второй обмотки r_2, *м.*:

$$r_2 = \frac{\delta_2}{2} \times k_B = \frac{2{,}6 \times 10^{-3}}{2} \times 1{,}1 = 1{,}43 \times 10^{-3}$$

Средняя длина витка второй обмотки $l_{СРВ2}$, *м.*:

$$l_{СРВ2} = 2 \times (a_К + b_К) + 2 \times \pi \times r_2 = \\ = 2 \times (27{,}9 \times 10^{-3} + 38{,}8 \times 10^{-3}) + \\ +2 \times 1{,}43 \times 10^{-3} = 0{,}143$$

Средний радиус изгиба первичной обмотки r_1, *м.*:

$$r_1 = \left(\delta_2 + h_{ИЗМО21} \times k_{МО21} + \frac{\delta_1}{2}\right) \times k_в =$$

$$= \left(2{,}6 \times 10^{-3} + 0{,}44 \times 10^{-3} \times 1{,}27 + \frac{3{,}72 \times 10^{-3}}{2}\right) \times 1{,}1 = 5{,}52 \times 10^{-3}$$

Средняя длина витка первичной обмотки $l_{СРВ1}$, *м.*:

$$l_{СРВ1} = 2 \times (a_К + b_К) + 2 \times \pi \times r_1 = 2 \times (27{,}9 \times 10^{-3} + 38{,}9 \times 10^{-3}) + 2 \times \pi \times 5{,}52 \times 10^{-3} = 0{,}168$$

Средний радиус изгиба наружной обмотки r_3, *м.*:

$$r_3 = \left(\delta_2 + h_{ИЗМО21} \times k_{МО21} + \delta_2 + h_{ИЗМО13} \times k_{МО13} + \frac{\delta_3}{2}\right) \times k_в =$$

$$= \left(3{,}72 \times 10^{-3} + 0{,}44 \times 10^{-3} \times 1{,}27 + 2{,}6 \times 10^{-3} + 0{,}33 \times 10^{-3} \times 1{,}2 + \frac{1{,}13 \times 10^{-3}}{2}\right) \times 1{,}1 =$$

$$= 8{,}62 \times 10^{-3}$$

Средняя длина витка наружной обмотки $l_{СРВ3}$, *м.*:

$$l_{СРВ3} = 2 \times (a_К + b_К) + 2 \times \pi \times r_3 = 2 \times (27{,}9 \times 10^{-3} + 38{,}9 \times 10^{-3}) + 2 \times \pi \times 8{,}62 \times 10^{-3} = = 0{,}188$$

Масса меди первичной обмотки $G_{М1}$, *кг*:

$$G_{М1} = 8900 \times W_1 \times q_1 \times l_{СРВ1} = 8900 \times 226 \times 0{,}2734 \times 10^{-6} \times 0{,}168 = 92{,}4 \times 10^{-3}$$

Масса меди второй обмотки $G_{М2}$, *кг*:

$$G_{М2} = 8900 \times W_2 \times q_2 \times l_{СРВ2} = 8900 \times 317 \times 0{,}1134 \times 10^{-6} \times 0{,}143 = 45{,}8 \times 10^{-3}$$

Масса меди третьей обмотки $G_{М3}$, *кг*:

$$G_{М3} = 8900 \times W_3 \times q_3 \times l_{СРВ3} = 8900 \times 19 \times 0{,}7854 \times 10^{-6} \times 0{,}188 = 25{,}0 \times 10^{-3}$$

Суммарная масса обмоток трансформатора $G_М$, *кг*:

$$G_М = G_{М1} + G_{М2} + G_{М3} = 92{,}4 \times 10^{-3} + 45{,}8 \times 10^{-3} + 25{,}0 \times 10^{-3} = 0{,}163$$

Средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике $l_{СТ}$, *м.*:

$$l_{СТ} = 2 \times (h + c + a) = 2 \times (39 \times 10^{-3} + 14 \times 10^{-3} + 22 \times 10^{3}) = 0{,}150$$

Поперечное сечение магнитопровода (по стали) $Q_{СТ}$, *м*^{2}:

$$Q_{СТ} = k_{СТ} \times a \times b = 0{,}85 \times 22 \times 10^{-3} \times 33 \times 10^{-3} = 6{,}17 \times 10^{-4}$$

Масса стали трансформатора $G_{СТ}$, *кг*:

$$G_{СТ} = \gamma_{СТ} \times l_{СТ} \times Q_{СТ} = 7800 \times 0{,}150 \times 6{,}17 \times 10^{-4} = 0{,}722$$

где $\gamma_{СТ}$ – удельный вес стали, *кг/м*^{3}.

Отношение массы стали к массе меди, α:

$$\alpha = \frac{G_{СТ}}{G_М} = \frac{0{,}722}{0{,}163} = 4{,}43$$

При расчете трансформатора на минимум стоимости отношение α должно быть в пределах 4…6. Для рассчитываемого трансформатора это условие выполняется.

Потери в стали $P_{СТ}$, *Вт*:

$$P_{СТ} = P_{УД} \times G_{СТ} = 5{,}5 \times 0{,}727 = 3{,}97$$

где $P_{УД}$ – удельные потери, *Вт/кг*.

Активная составляющая намагничивающего тока $I_{0А}$, *А*:

$$I_{0А} = \frac{P_{СТ}}{E_1} = \frac{3{,}97}{217{,}4} = 0{,}0183$$

Реактивная составляющая намагничивающего тока $I_{0Р}$, *А*:

$$I_{0P} = \frac{H_c \times 0{,}8 \times Bc \times n \times \delta}{\sqrt{2} \times W_1} = \frac{220 \times 0{,}15 + 0{,}8 \times 0{,}879 \times 2 \times 10^{-3} \times 10^{-6}}{\sqrt{2} \times 226} = 0{,}196$$

где *Нс* – напряженность поля в стали, *А/м.*; *n* – число зазоров (стыков) на пути силовой линии; *δэ* – величина эквивалентного воздушного зазора в стыках сердечника трансформатора, *м*.

Ток холостого хода I_{10}, А:

$$I_{10} = \sqrt{I_{0\text{А}}^2 + I_{0p}^2} = \sqrt{0{,}0183^2 + 0{,}191^2} = 0{,}192$$

Активная составляющая приведенного тока второй обмотки $I_{2\text{А}}$, *А*:

$$I'_{2\text{А}} = \frac{S_2 \times cos\varphi_2}{U_2} \times \frac{W_2}{W_1} = \frac{120 \times 0{,}65}{300} \times \frac{317}{226} = 0{,}365$$

Активная составляющая приведенного тока третьей обмотки $I'_{3\text{А}}$, А:

$$I'_{3\text{А}} = \frac{S_3 \times cos\varphi_3}{U_3} \times \frac{W_3}{W_1} = \frac{50 \times 0{,}9}{18} \times \frac{19}{226} = 0{,}21$$

Реактивная составляющая приведенного тока второй обмотки I'_{2P}, *А*:

$$I'_{2P} = \frac{S_2 \times cos\varphi_2}{U_2} \times \frac{W_2}{W_1} = \frac{120 \times 0{,}76}{300} \times \frac{317}{226} = 0{,}421$$

Реактивная составляющая приведенного тока третьей обмотки I'_{3P}, *А*:

$$I'_{3P} = \frac{S_3 \times cos\varphi_2}{U_3} \times \frac{W_3}{W_1} = \frac{50 \times 0{,}436}{226} \times \frac{19}{226} = 0{,}102$$

Активная составляющая тока первичной обмотки при номинальной нагрузке $I_{1\text{А}}$, *А*:

$$I_{1\text{А}} = I_{0\text{А}} + I'_{2\text{А}} + I'_{3\text{А}} = 0{,}0183 + 0{,}365 + 0{,}21 = 0{,}593$$

Реактивная составляющая тока первичной обмотки при номинальной нагрузке $I_{1\text{Р}}$, *А*:

$$I_{1P} = I_{0P} + I'_{2P} + I'_{3P} = 0{,}191 + 0{,}426 + 0{,}102 = 0{,}719$$

Полный ток первичной обмотки при номинальной нагрузке, *А*:

$$I_1 = \sqrt{I_{1\text{А}}^2 + I_{1P}^2} = \sqrt{0{,}593^2 + 0{,}719^2} = 0{,}932$$

Относительное значение тока холостого хода I^*_{10} , о. е.:

$$I^*_{10} = \frac{I_{10}}{I_1} = \frac{0{,}192}{0{,}932} = 0{,}2$$

Величина относительного тока холостого хода при частоте 400 *гц* лежит в пределах 0,1…0,2, следовательно, выбор магнитопровода на этой стадии расчета можно считать оконченным.

Коэффициент мощности:

$$cos\varphi_1 = \frac{I_{1А}}{I_1} = \frac{0,593}{0,932} = 0,636$$

Потери в первичной обмотке при температуре 90°С $P_{М1}$, *Вт*:

$$P_{М1} = k_{90} \times j_1^2 \times G_{М1} \times 10^{-12} = 2,52 \times (3,57 \times 10^6)^2 \times 0,0924 \times 10^{-12} = 2,97$$

где k_{90} – коэффициент, зависящий от температуры провода.

Потери во второй обмотке при температуре 90°С $P_{М2}$, *Вт*:

$$P_{м2} = k_{90} \times j_2^2 \times G_{М2} \times 10^{-12} = 2,52 \times (3,53 \times 10^6)^2 \times 0,0458 \times 10^{-12} = 1,44$$

Потери в третьей обмотке при температуре 90°С $P_{М3}$, *Вт*:

$$P_{м3} = k_{90} \times j_3^2 \times G_{М3} \times 10^{-12} = 2,52 \times (3,54 \times 10^6)^2 \times 0,025 \times 10^{-12} = 0,789$$

Суммарные потери в меди обмоток $P_М$, *Вт*:

$$P_М = P_{М1} + P_{М2} + P_{М3} = 2,97 + 1,44 + 0,789 = 5,2$$

Отношение β:

$$\beta = \frac{P_М}{P_{СТ}} = \frac{5,2}{3,97} = 1,31$$

Отношение β находится в пределах 0,9…1,5 при частоте 400 *гц*, следовательно, трансформатор спроектирован удовлетворительно.
Удельное сопротивление медного провода при температуре 90°С ρ_{90}, *Ом×м*:

$$\rho_{90} = \rho_{20} \times [1 + \alpha t \times (\theta_{ОБ} - 20)] = 1,75 \times 10^{-8} \times [1 + 0,004 \times (90 - 20)] = 2,24 \times 10^{-8}$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление медного провода при температуре 20°С, *Ом×м.*; αt – температурный коэффициент сопротивления меди; $\theta_{ОБ}$ – температура обмотки, *С*.

Активное сопротивление первичной обмотки при температуре 90°С r_{1t}, *Ом*:

$$r_{1t} = \rho_{90} \times l_{СРВ1} \times \frac{W_1}{q_1} = 2,24 \times 10^{-8} \times 0,168 \times \frac{226}{0,2734 \times 10^{-6}} = 3,11$$

Активное сопротивление второй обмотки при температуре 90°С r_{2t}, *Ом*:

$$r_{2t} = \rho_{90} \times l_{СРВ2} \times \frac{W_2}{q_2} = 2,24 \times 10^{-8} \times 0,143 \times \frac{317}{0,1134 \times 10^{-6}} = 8,95$$

Активное сопротивление третьей обмотки при температуре 90°С r_{3t}, *Ом*:

$$r_{3t} = \rho_{90} \times l_{СРВ3} \times \frac{W_3}{q_3} = 2,24 \times 10^{-8} \times 0,188 \times \frac{19}{0,7854 \times 10^{-6}} = 0,102$$

Сопротивление второй обмотки, приведенное к первичной, r_2, *Ом*:

$$r_2' = r_{2t} \times \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 = 8,95 \times \left(\frac{226}{317}\right)^2 = 4,55$$

Сопротивление третьей обмотки, приведенное к первичной, r_3, *Ом*:

$$r'_3 = r_{3t} \times \left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2 = 0{,}102 \times \left(\frac{226}{19}\right)^2 = 14{,}4$$

Ток второй обмотки, приведенный к первичной, I'_2, *А*:

$$I'_2 = I_2 \times \frac{W_2}{W_1} = 0{,}4 \times \frac{317}{223} = 0{,}561$$

Ток третьей обмотки, приведенный к первичной, I'_3, *А*:

$$I'_3 = I_3 \times \frac{W_3}{W_1} = 2{,}78 \times \frac{19}{226} = 0{,}234$$

Относительный ток второй обмотки I^*_2, о. е.:

$$I^*_2 = \frac{I'_2}{I_1} = \frac{0{,}561}{0{,}932} = 0{,}602$$

Относительный ток третьей обмотки I^*_3, о. е.:

$$I^*_3 = \frac{I'_3}{I_1} = \frac{0{,}234}{0{,}932} = 0{,}251$$

Средняя длина витков первой и второй обмоток l_{12}, *м*.:

$$l_{12} = \frac{l_{\text{СРВ1}} + l_{\text{СРВ2}}}{2} = \frac{0{,}168 + 0{,}143}{2} = 0{,}156$$

Средняя длина витков первой и третьей обмоток l_{13}, *м*.:

$$l_{13} = \frac{l_{\text{СРВ1}} + l_{\text{СРВ3}}}{2} = \frac{0{,}168 + 0{,}188}{2} = 0{,}178$$

Площадь канала рассеяния S_{P1}, $м^2$:

$$S_{P1} = I^*_2 \times l_{12} \times \left(I^*_2 \times \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_{\text{В}} \times k_{\text{мо21}} \times h_{\text{ИЗМО21}}}{2}\right) +$$

$$+I^*_3 \times l_{13} \times \left(I^*_3 \times \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_{\text{В}} \times k_{\text{МО13}} \times h_{\text{ИЗМО13}}}{2}\right)$$

$$S_{P1} = 0{,}602 \times 0{,}156 \times \left(0{,}602 \times \frac{3{,}72 \times 10^{-3}}{3} + \frac{1{,}1 \times 1{,}27 \times 0{,}44 \times 10^{-3}}{2}\right) +$$

$$+0{,}251 \times 0{,}178 \times \left(0{,}251 \times \frac{3{,}72 \times 10^{-3}}{3} + \frac{1{,}1 \times 1{,}2 \times 0{,}33 \times 10^{-3}}{2}\right) = 1{,}23 \times 10^{-4}$$

Площадь канала рассеяния S_{P2}, $м^2$:

$$S_{P2} = \frac{k_{\text{В}} \times k_{\text{МО21}} \times h_{\text{ИЗМО21}}}{2} \times l_{12} + \frac{\delta_2}{3} \times l_{\text{СРВ2}} =$$

$$= \frac{1{,}1 \times 1{,}27 \times 0{,}44 \times 10^{-3}}{2} \times 0{,}156 + \frac{2{,}6 \times 10^{-3}}{3} \times 0{,}143 = 1{,}72 \times 10^{-4}$$

Площадь канала рассеяния S_{P3}, $м^2$:

$$S_{P3} = \frac{\delta_3}{3} \times l_{СРВ3} + \frac{k_в \times k_{МО13} \times h_{ИЗМО13}}{2} \times l_{13} =$$

$$= \frac{1{,}13 \times 10^{-3}}{3} \times 0{,}188 + \frac{1{,}1 \times 1{,}2 \times 0{,}33 \times 10^{-3}}{2} \times 0{,}178 = 1{,}1 \times 10^{-4}$$

Высота катушки $h_К$, *м*.:

$$h_К = h - 2 \times h_{ИЗ} = 39 \times 10^{-3} - 2 \times 3 \times 10^{-3} = 33 \times 10^{-3}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки x^*_1 , о. е.:

$$x_1^* = \frac{7{,}9 \times W_1 \times I_1 \times f \times 10^{-6}}{E_B} \times \frac{S_{P1}}{h_К}$$

$$x_1^* = \frac{7{,}9 \times 226 \times 0{,}932 \times 400 \times 10^{-6}}{0{,}962} \times \frac{1{,}23 \times 10^{-4}}{33 \times 10^{-3}} = 2{,}58 \times 10^{-3}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния второй обмотки x^*_2, о. е.:

$$x_2^* = \frac{7{,}9 \times W_1 \times I_1 \times f \times 10^{-6}}{E_B} \times \frac{S_{P2}}{h_К}$$

$$x_2^* = \frac{7{,}9 \times 226 \times 0{,}932 \times 400 \times 10^{-6}}{0{,}962} \times \frac{1{,}72 \times 10^{-4}}{33 \times 10^{-3}} = 3{,}61 \times 10^{-3}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния третьей обмотки x^*_3, о. е.:

$$x_3^* = \frac{7{,}9 \times W_1 \times I_1 \times f \times 10^{-6}}{E_B} \times \frac{S_{P3}}{h_К}$$

$$x_3^* = \frac{7{,}9 \times 226 \times 0{,}932 \times 400 \times 10^{-6}}{0{,}962} \times \frac{1{,}1 \times 10^{-4}}{33 \times 10^{-3}} = 2{,}31 \times 10^{-3}$$

Активная составляющая падения напряжения в первичной обмотке при номинальной нагрузке $\Delta U^*_{А1}$, о. е.:

$$\Delta U_{А1}^* = \frac{r_{1t} \times I_1}{U_1} = \frac{3{,}11 \times 0{,}932}{220} = 0{,}0132$$

Активная составляющая падения напряжения во второй обмотке при номинальной нагрузке $U^*_{А2}$, о. е.:

$$\Delta U_{А2}^* = \frac{r_{2t} \times I_1}{U_1} = \frac{8{,}95 \times 0{,}932}{220} = 0{,}0379$$

Активная составляющая падения напряжения третьей обмотки при номинальной нагрузке $U^*_{А3}$, о. е.:

$$\Delta U_{А3}^* = \frac{r_{3t} \times I_1}{U_1} = \frac{0{,}102 \times 0{,}932}{220} = 0{,}0432 \times 10^{-3}$$

Реактивные составляющие падений напряжений в обмотках при номинальной нагрузке, о. е.:

$$\Delta U_{P1}^{*} = x_1^{*} \quad \Delta U_{P1}^{*} = 2{,}58 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{P2}^{*} = x_2^{*} \quad \Delta U_{P2}^{*} = 3{,}61 \times 10^{-3}$$

$$\Delta U_{P3}^{*} = x_3^{*} \quad \Delta U_{P3}^{*} = 2{,}31 \times 10^{-3}$$

Полное падение напряжения на второй обмотке при номинальной нагрузке трансформатора $U*_{12}$, о. е.:

$$\Delta U_{12}^{*} = \Delta U_{A1}^{*} \times cos\varphi_1 + \Delta U_{P1}^{*} \times sin\varphi_1 + \frac{I_2 \times W_2}{I_1 \times W_1} \times (\Delta U_{A2}^{*} \times cos\varphi_2 + \ \Delta U_{P2}^{*} \times sin\varphi_2)$$

$$\Delta U_{12}^{*} = 0{,}0132 \times 0{,}636 + 2{,}58 \times 10^{-3} \times 0{,}772 +$$

$$+ \frac{0{,}4 \times 317}{0{,}932 \times 226} \times (0{,}0379 \times 0{,}65 + 3{,}61 \times 10^{-3} \times 0{,}76) = 0{,}0269$$

Полное падение напряжения на третьей обмотке при номинальной нагрузке трансформатора $U*_{13}$, о. е.:

$$\Delta U_{13}^{*} = \Delta U_{A1}^{*} \times cos\varphi_1 + \Delta U_{P1}^{*} \times sin\varphi_1 + \frac{I_3 \times W_3}{I_1 \times W_1} \times (\Delta U_{A3}^{*} \times cos\varphi_3 + \ \Delta U_{P3}^{*} \times sin\varphi_3)$$

$$\Delta U_{13}^{*} = 0{,}0132 \times 0{,}636 + 2{,}58 \times 10^{-3} \times 0{,}772 +$$

$$+ \frac{2{,}78 \times 19}{0{,}932 \times 226} \times (0{,}432 \times 10^{-3} \times 0{,}9 + 2{,}31 \times 10^{-3} \times 0{,}436) = 0{,}0107$$

Напряжение на второй обмотке при номинальной нагрузке $U_{2РАСЧ}$, *в*:

$$U_{2РАСЧ} = \frac{W_2}{W_1} \times U_1 \times (1 - \Delta U_{12}^{*}) = \frac{317}{226} \times 220 \times (1 - 0{,}0269) = 300{,}3$$

Напряжение на третьей обмотке при номинальной нагрузке $U_{3РАСЧ}$, *в*:

$$U_{3РАСЧ} = \frac{W_3}{W_1} \times U_1 \times (1 - \Delta U_{13}^{*}) = \frac{19}{226} \times 220 \times (1 - 0{,}0107) = 18{,}3$$

Относительная разность заданных и полученных значений напряжений на второй обмотке ε_2, %:

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2 - U_{2РАСЧ}}{U_2} \times 100 = \frac{300 - 300{,}3}{300} \times 100 = 0{,}1$$

Относительная разность заданных и полученных значений напряжений на третьей обмотке ε_3, %:

$$\varepsilon_3 = \frac{U_3 - U_{3РАСЧ}}{U_3} \times 100 = \frac{18 - 18{,}3}{18} \times 100 = 1{,}67$$

Так как относительные погрешности ε_2 и ε_3 не превышают 2…8 %, то необходимости уточнения числа витков W_2 или W_3 нет.

Суммарную активную мощность вторичных обмоток трансформатора P, Bm, можно определить по формуле:

$$P = U_{2\text{РАСЧ}} \times I_2 \times cos\varphi_2 + U_{3\text{РАСЧ}} \times I_3 \times cos\varphi_3 = 300{,}3 \times 0{,}4 \times 0{,}65 + 18{,}3 \times 2{,}78 \times 0{,}9 = 123{,}9$$

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке η:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}} = \frac{123{,}9}{123{,}9 + 5{,}2 + 3{,}97} = 0{,}931$$

Открытая поверхность охлаждения сердечника $Q_{\text{СЕРД}}$, $м^2$:

$$Q_{\text{СЕРД}} = 2 \times (a + b) \times (a + 2 \times c + h) + 4 \times a \left(b + \frac{a}{2}\right)$$

$$Q_{\text{СЕРД}} = 2 \times (22 \times 10^{-3} + 33 \times^{-3}) \times (22 \times 10^{-3} + 2 \times 14 \times 10^{-3} + 39 \times 10^{-3}) +$$

$$+4 \times 22 \times 10^{-3} \times \left(33 \times 10^{-3} + \frac{22 \times 10^{-3}}{2}\right) = 136{,}6 \times 10^{-4}$$

Средний радиус изгиба катушки $r_{\text{К}}$, $м.$:

$$r_{\text{К}} = \frac{1}{2} \times (\delta_1 + h_{\text{ИЗМО21}} \times k_{\text{МО21}} + \delta_2 + h_{\text{ИЗМО13}} \times k_{\text{МО13}} + \delta_3 + h_{\text{ИЗН}} \times k_{\text{НО}}) \times k_B$$

$$r_{\text{К}} = \frac{1}{2} \times (3{,}72 \times 10^{-3} + 0{,}44 \times 10^{-3} \times 1{,}27 + 2{,}6 \times 10^{-3} \times 0{,}33 \times 10^{-3} \times 1{,}2 + 1{,}13 \times 10^{-3} + 0{,}54 \times 10^{-3} \times 1{,}85) \times 1{,}1 = 5{,}17 \times 10^{-3}$$

Средняя длина витка катушки $l_{\text{ВСР}}$, $м.$:

$$l_{\text{ВСР}} = 2 \times (a_{\text{К}} + b_{\text{К}}) + 2 \times \pi \times r_{\text{К}} = 2 \times (27{,}9 \times 10^{-3} + 38{,}9 \times 10^{-3}) + 2 \times \pi \times 5{,}17 \times 10^{-3} = 0{,}166$$

Открытая поверхность обмоток трансформатора $Q_{\text{ОБМ}}$, $м^2$:

$$Q_{\text{ОБМ}} = 2 \times h \times (a + 4 \times c) = 2 \times 39 \times 10^{-3} \times (22 \times 10^{-3} + 4 \times 14 \times 10{:}-3) = 60{,}8 \times 10^{-4}$$

Превышение температуры наиболее нагретой части трансформатора над температурой окружающей среды $\Delta\theta_{\text{ТР}}$, °C:

$$\Delta\theta_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}}{k_{\text{Т}} \times (Q_{\text{ОБМ}} + Q_{\text{СЕРД}})} + \Delta\theta = \frac{5{,}2 + 3{,}97}{13 \times (60{,}8 \times 10^{-4} + 136{,}6 \times 10^{-4})} + 15 = 50{,}7$$

где $k_{\text{Т}}$ – средний коэффициент теплоотдачи с охлаждающей поверхности трансформатора, $Bm/(м^2 \times °C)$; $\Delta\theta$ – перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, $°C$.

Температура наиболее нагретой части трансформатора $\theta_{\text{ТР}}$, $°C$:

$$\theta_{\text{ТР}} = \ \theta_{\text{ТР}} + \theta_0 = 50{,}7 + 30 = 80{,}7$$

Так как температура $\theta_{\text{ТР}}$ не превышает допустимую для изоляции класса нагревостойкости А, то трансформатор в тепловом отношении спроектирован верно.

Сводные данные расчета трансформатора.

Масса стали сердечника, *кг*. – 0,722
Удельный расход стали, *кг/кВА* – 4,25
Масса меди обмоток, *кг*. – 0,163
Удельный расход меди, *кг/кВА* – 0,959
Отношение массы стали к массе меди – 4,43
Потери в стали сердечника, *Вт*. – 3,97
Потери в меди обмоток, *Вт* – 5,2
Отношение потерь в меди к потерям в стали 1,31
Кпд при номинальной нагрузке – 0,931
Максимальное превышение температуры обмотки трансформатора над температурой окружающей среды, *°С* – 50,7
Относительный ток холостого хода – 0,206
Относительные изменения напряжения при номинальной нагрузке:
на второй обмотке – 0,0269
на третьей обмотке – 0,0107
Задание на намотку трансформатора приведено в приложении 3.

5. Контрольные вопросы к защите курсовой работы.

1. Принцип работы трансформатора.
2. Области применения ТММ.
3. Материалы, применяемые для изготовления трансформаторов.
4. Какие параметры трансформатора влияют на его размеры?
5. Что такое магнитная индукция?
6. Физический смысл коэффициента заполнения окна.
7. Физический смысл коэффициента заполнения стали.
8. Назовите типы сердечников ТММ.
9. Что такое коэффициент трансформации и как его определить опытным путем?
10. Объясните выбор межслоевой и межобмоточной изоляции.
11. Как осуществляется сборка трансформатора?
12. Как выбирается плотность тока в обмотках трансформатора?
13. Как производится выбор сечения проводников обмоток?
14. Какие параметры трансформатора влияют на величину сечения стержня сердечника?
15. Какие параметры влияют на величину *эдс* одного витка?
16. Как определяется число витков отдельных обмоток?
17. Почему напряжения на зажимах вторичных обмоток при нагрузке отличаются от напряжений при холостом ходе?
18. От чего зависит выбор последовательности размещения обмоток на стержне?
19. Какие потери имеют место при работе трансформатора?
20. От чего зависят потери в меди?
21. Какие параметры влияют на величину потерь в стали?
22. От чего зависит величина тока холостого хода?
23. Что такое напряжение короткого замыкания?
24. Какие потери в трансформаторе называют постоянными, почему?
25. Какие потери в трансформаторе называют переменными, почему?
26. На что повлияет увеличение величины воздушного зазора в стыках сердечника при не качественной сборке трансформатора?
27. Почему трансформатор не может работать от сети постоянного тока?
28. От чего зависят активная и реактивная составляющие тока холостого хода?

29. Изменяется ли величина основного потока в сердечнике ТММ при увеличении тока нагрузки?
30. От чего зависит величина сопротивления обмоток?
31. Как температура влияет на величину сопротивления обмоток?
32. Какие параметры влияют на величину индуктивного сопротивления обмоток?
33. Что такое коэффициент полезного действия, какие параметры влияют на его величину?
34. Что влияет на величину превышения температуры трансформатора над температурой окружающей среды?
35. Нарисуйте схему замещения трехобмоточного трансформатора.
36. Что такое приведенные параметры вторичных обмоток?
37. Покажите на чертеже основные элементы конструкции трансформатора.

Заключение.

Улучшение технико–экономических и эксплуатационных показателей современных трансформаторов малой мощности является важнейшей задачей при создании эффективных схем электропитания различного электротехнического оборудования и систем управления. Использование современных проводниковых, изоляционных и конструкционных материалов, применение новых дизайнерских решений, совершенствование методов расчета и проектирования являются перспективными направлениями в дальнейшем развитии трансформаторов малой мощности.

Библиографический список

1. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.
Электрические машины и микромашины, М. Высш. школа, 1990.
2. Белопольский И. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г.
Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М. Альянс, 2013.
3. Ермолин Н. П. Расчет трансформаторов малой мощности. М. Энергия, 1969.
4. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М. Советское радио, 1971.

Приложение 1. Обмоточные провода.

Диаметр голого провода, *мм*.	Сечение голого провода, *мм*^{2}	Диаметр провода с изоляцией, *мм*.		
		ПЭЛ	ПЭВ–1	ПБД
0,03	0,000706	0,045	0,045	–
0,04	0,00126	0,055	0,055	–
0,05	0,00196	0,065	0,070	–
0,06	0,00283	0,075	0,085	–
0,07	0,00385	0,085	0,95	–
0,08	0,00503	0,095	0,105	–
0,09	0,00636	0,105	0,115	–
0,10	0,00785	0,12	0,125	–
0,11	0,00950	0,13	0,135	–
0,12	0,01131	0,14	0,145	–
0,13	0,01327	0,15	0,155	–
0,14	0,01539	0,16	0,165	–
0,15	0,01767	0,17	0,18	–
0,16	0,02011	0,18	0,19	–
0,17	0,02270	0,19	0,20	–
0,18	0,02545	0,20	0,21	–
0,19	0,02835	0,21	0,22	–
0,20	0,03142	0,225	0,23	0,39
0,21	0,03464	0,235	0,24	0,40
0,23	0,04155	0,255	0,27	0,42
0,25	0,04909	0,275	0,29	0,44
0,27	0,05726	0,31	0,31	0,49
0,29	0,06605	0,33	0,33	0,51
0,31	0,07548	0,35	0,35	0,53
0,33	0,08553	0,37	0,37	0,55
0,35	0,09621	0,39	0,39	0,57
0,38	0,1134	0,42	0,42	0,60
0,41	0,1320	0,45	0,45	0,63
0,44	0,1521	0,49	0,48	0,66
0,47	0,1735	0,52	0,51	0,69
0,49	0,1886	0,54	0,53	0,71
0,51	0,2043	0,56	0,56	0,73
0,53	0,2206	0,58	0,58	0,75
0,55	0,2376	0,60	0,60	0,77
0,57	0,2552	0,62	0,62	0,79
0,59	0,2734	0,64	0,64	0,81
0,62	0,3019	0,67	0,67	0,84
0,64	0,3217	0,69	0,69	0,86
0,67	0,3526	0,72	0,72	0,89
0,69	0,3739	0,74	0,74	0,91
0,72	0,4072	0,78	0,77	0,94
0,74	0,4301	0,80	0,80	0,96
0,77	0,4657	0,83	0,83	0,99
0,80	0,5027	0,86	0,86	1,02
0,83	0,5411	0,89	0,89	1,05
0,86	0,5809	0,92	0,92	1,08
0,90	0,6362	0,96	0,96	1,12

Диаметр голого провода, *мм.*	Сечение голого провода, *мм*^{2}	Диаметр провода с изоляцией, *мм.*		
		ПЭЛ	ПЭВ–1	ПБД
0,93	0,6793	0,99	0,99	1,15
0,96	0,7238	1,02	1,02	1,18
1,00	0,7854	1,07	1,08	1,27
1,04	0,8495	1,12	1,12	1,31
1,08	0,9161	1,16	1,16	1,35
1,12	0,9852	1,20	1,20	1,39
1,16	1,0568	1,24	1,24	1,43
1,20	1,1310	1,28	1,28	1,47
1,25	1,2272	1,33	1,33	1,52
1,30	1,3270	1,38	1,38	1,57
1,35	1,4314	1,43	1,43	1,62
1,40	1,5394	1,48	1,48	1,67
1,45	1,6513	1,53	1,53	1,72
1,50	1,7672	1,58	1,58	1,77
1,56	1,9113	1,64	1,64	1,83
1,62	2,0612	1,71	1,70	1,89
1,68	2,217	1,77	1,76	1,95
1,74	2,378	1,83	1,82	2,01
1,81	2,573	1,90	1,90	2,08
1,88	2,776	1,97	1,97	2,15
1,95	2,987	2,04	2,04	2,22
2,02	3,205	2,12	2,11	2,29
2,10	3,464	2,20	2,20	2,37
2,26	4,012	2,36	2,36	2,53
2,44	4,676	2,54	2,54	2,71

ПЭЛ – провод эмалированный лакостойкий;
ПЭВ–1 – провод, изолированный высокопрочной эмалью в один слой;
ПБД – провод, изолированный двумя слоями хлопчатобумажной пряжи.

Примечание составителя. Приведенные данные диаметров обмоточных проводов устарели. Следует обращаться к современным стандартам IEC–60317 (ГОСТ Р МЭК 60317–0–1–2013, ГОСТ Р МЭК 60317–0–6–2013), то же замечание относится к маркам проводов и изоляционным материалам упомянутых в данном пособии.

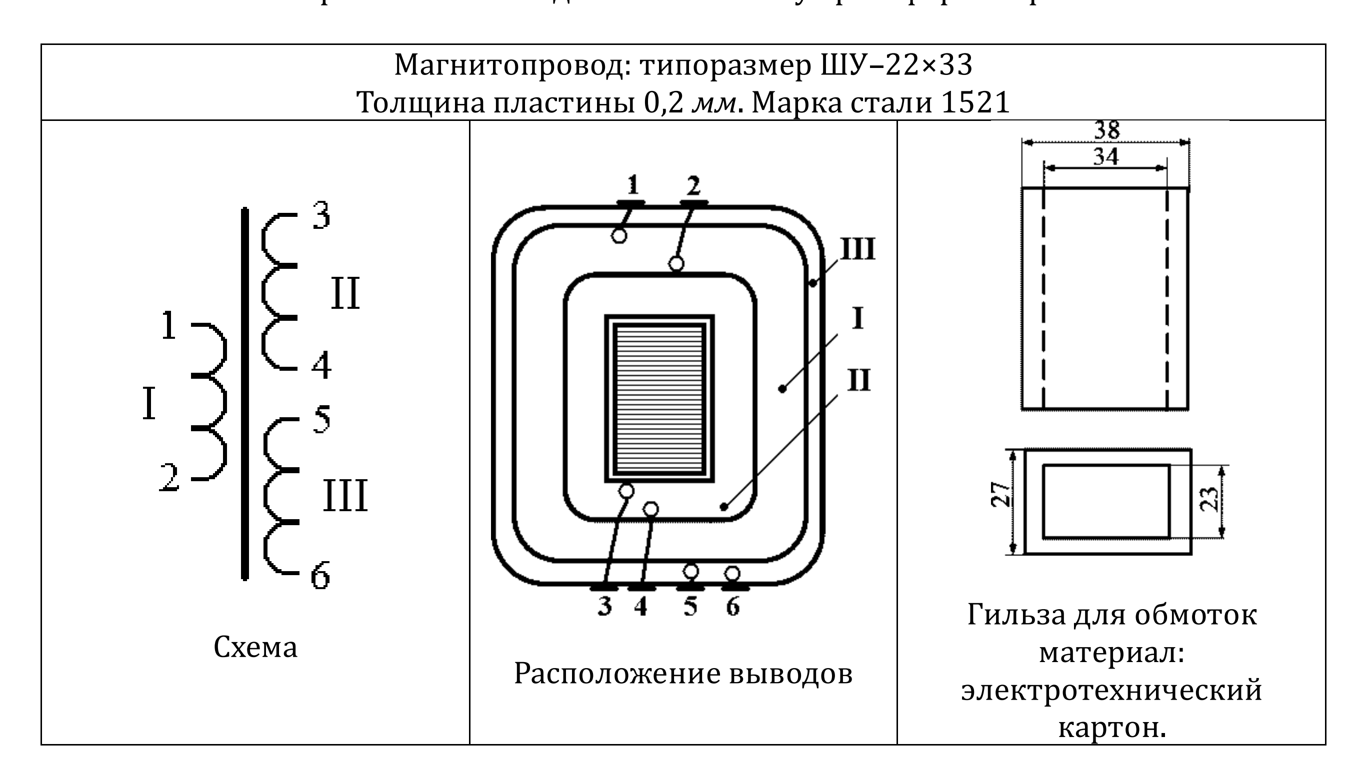
Приложение 2. Сердечники трансформаторов.

Тип магнитопровода	Размеры, *мм*,				Справочные величины, $см^2$	
	a	*b*	*h*	*c*	*Qc*	*Fo*
Броневые пластинчатые магнитопроводы						
Ш–10×10		10			1,00	
Ш–10×1б	10	16	25	10	1,60	2,5
Ш–10×20		20			2,00	
Ш–12×12		12			1,44	
Ш–12×16	12	16	30	12	1,92	3,6
Ш–12×25		25			3,00	
Ш–16×16		16			2,56	
Ш–16×20	16	20	40	16	3,20	6,4
Ш–16×25		25			4,00	
Ш–16×32		32			5,12	
Ш–20×12	20	12	50	20	2,40	10,00
Ш–20×16		16			3,20	
Ш–20×20		20			4,00	
Ш–20×32	20	32	50	20	6,40	10,00
Ш–20×40		40			8,00	
Ш–25×25		25			6,25	
Ш–25×32	25	32	62,5	25	8,00	15,625
Ш–25×50		50			12,5	
Ш–32×20		20			6,4	
Ш–32×25		25			8,00	
Ш–32×32	32	32	80	32	10,24	25,6
Ш–32×40		40			12,80	
Ш–32×50		50			16,00	
Ш–40×25		25			10,00	
Ш–40×40	40	40	100	40	16,00	40,00
Ш–40×60		60			24,00	
Ш–40×80		80			48,00	
Сердечники броневые пластинчатые с уширенным ярмом						
ШУ–10×10	10	10	18	6,5	1,00	1,17
ШУ–12×12	12	12	22	8,0	1,44	1,76
ШУ–14×14	14	14	25	9,0	1,96	2,25
ШУ–16×16	16	16	28	10,0	2,56	2,80
ШУ–19×19		19			3,61	
ШУ–19×28	19	28	33,5	12	5,32	4,02
ШУ–19×38		38			7,22	
ШУ–22×22	22	22	39	14	4,84	5,46
ШУ–22×33		33			7,26	
ШУ–26×26		26			6,76	
ШУ–26×39	26	39	47	17	10,14	7,99
ШУ–26×52		52			13,52	
ШУ–30×30		30			9,00	
ШУ–30х45	30	45	53	19	13,45	10,07
ШУ–30×60		60			18,00	
ШУ–35×35		35			12,25	
ШУ–35×52	35	52	61,5	22	18,20	13,53
ШУ–35×70		70			24,50	

Тип магнитопровода	Размеры, *мм*,				Справочные величины, $см^2$	
	a	*b*	*h*	*c*	*Qc*	*Fo*
Броневые ленточные магнитопроводы						
ШЛ–12×12,5	12	12,5	30	12	1,50	3,6
ШЛ–12×16		16			1,92	
ШЛ–12×20		20			2,40	
ШЛ–12×25		25			3,00	
ШЛ–16×16	16	16	40	16	2,56	6,4
ШЛ–16×20		20			3,20	
ШЛ–16×25		25			4,00	
ШЛ–16×32		32			5,12	
ШЛ–20×20	20	20	50	20	4,00	10
ШЛ–20×32		32			6,40	
ШЛ–20×25		25			5,00	
ШЛ–20×40		40			8,00	
ШЛ–25×25	25	25	62,5	25	6,25	15,6
ШЛ–25×32		32			8,00	
ШЛ–25×40		40			10,00	
ШЛ–25×50		50			12,50	
ШЛ–32×32	32	32	80	32	10,24	25,6
ШЛ–32×40		40			12,80	
ШЛ–32×50		50			16,00	
ШЛ–32×64		64			20,48	
ШЛМ–12×10	12	10	23	8	1,2	1,84
ШЛМ–12×12,5		12,5			1,5	
ШЛМ–12×16		16			1,92	
ШЛМ–12×20		20			2,4	
ШЛМ–12×25		25			3,0	
ШЛМ–16×12,5	16	12,5	26	9	2,00	2,34
ШЛМ–16×16		16			2,56	
ШЛМ–16х20		20			3,20	
ШЛМ–16х25		25			4,00	
ШЛМ–16х32		32			5,12	
ШЛМ–20×16	20	16	36	12	3,2	4,32
ШЛМ–20×20		20			4,0	
ШЛМ–20×25		25			5,0	
ШЛМ–20×32		32			5,4	
ШЛМ–20×40		40			8,0	
ШЛМ–25×20	25	20	45	15	5,00	6,75
ШЛМ–25×25		25			6,25	
ШЛМ–25×32		32			8,00	
ШЛМ–25×40		40			10,00	
ШЛМ–25×50		50			12,50	
ШЛМ–32×25	32	25	55	18	8,00	9,90
ШЛМ–32×32		32			10,24	
ШЛМ–32×40		40			12,80	
ШЛМ–32×50		50			16,00	
ШЛМ–40×32	40	32	72		12,80	17,28
ШЛМ–40×40		40		24	16,00	
ШЛМ–40×50		50			20,00	
ШЛМ–40×64		64			25,60	

Тип магнитопровода	Размеры, *мм*,				Справочные величины, *см*^{2}	
	a	*b*	*h*	*c*	*Qc*	*Fo*
Стержневые ленточные магнитопроводы						
ПЛ 12,5×16–25	12,5	16	25	16	2,00	4,00
ПЛ 12,5×16–32			32			5,12
ПЛ 12,5×16–40			40			6,40
ПЛ 12,5×16–50			50			8,00
ПЛ 12,5×25–32	12,5	25	32	20	3,125	6,40
ПЛ 12,5×25–40			40			8,00
ПЛ 12,5×25–50			50			10,00
ПЛ 12,5×25–60			60			12,00
ПЛ 16×32–40	16	32	40	25	5,12	10,00
ПЛ 16×32–50			50			12,50
ПЛ 16×32–65			65			16,25
ПЛ 16×32–80			80			20,00
ПЛ 20×40–50	20	40	50	32	8,00	16,00
ПЛ 20×40–60			60			19,20
ПЛ 20×40–80			80			25,60
ПЛ 20×40–100			100			32,00
ПЛ 25×50–65	25	50	65	40	12,50	26,00
ПЛ 25×50–80			80			40,00
ПЛ 25×50–100			100			50,00
ПЛ 25×50–120			120			60,00
ПЛ 14×20	14	20	45	11 ,5	2,8	5,2
ПЛ 14×25		25			3,5	
ПЛ 14×32		32			4,5	
ПЛ 14×36		36			5,0	
ПЛ 16×20	16	20	60	16	3,2	9,6
ПЛ 16×25		25			4,0	
ПЛ 16×32		32			5,1	
ПЛ 16×40		40			6,4	
ПЛ 18×25	18	25	71	18	4,5	13,0
ПЛ 18×32		32			5,8	
ПЛ 18×40		40			7,2	
ПЛ 18×45		45			8,1	
ПЛ 21×36	21	36	85	25	7,6	21,0
ПЛ 21×40		40			8,4	
ПЛ 21×45		45			9,5	
ПЛ 25×40	25	40	100	28	10,0	28
ПЛ 25×45		45			11,3	
ПЛ 25×50		50			12,5	
ПЛ 28×40	28	40	120	32	11,2	38
ПЛ 28×45		45			12,6	
ПЛ 28×50		50			14,0	

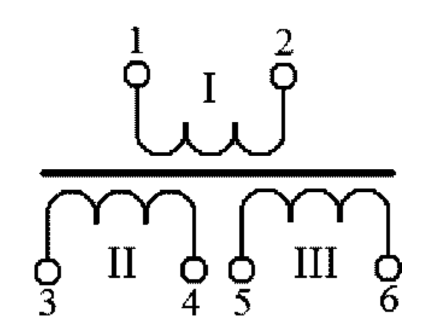
Приложение 3. Задание на намотку трансформатора.



Обмоточные данные.

номер обмотки	провод	витков	витков в слое	слоев	высота намотки	масса меди
I	ПЭЛ 0,59/0,64	226	49	5	32,7	92,4
II	ПЭЛ 0,38/0,42	317	75	5	33,1	45,8
III	ПЭЛ 1,00/1,07	19	19	1	21,3	25,0

Выводы на лепестки своим проводом согласно эскизу.
Изоляция между слоями первичной обмотки – бумага ЭИП–50 0,08 *мм*.;
– между слоями второй обмотки – бумага ЭИП–50 0,08 *мм*.;
– между второй и первичной обмотками – кабельная бумага К–12, 4 слоя;
– между первичной и третьей обмотками – кабельная бумага К–12, 3 слоя;
– поверх катушки – кабельная бумага К–12, 2 слоя; батистовая лента 0,16 *мм*. 1 слой с половинным перекрытием.
Пропитка: без пропитки.

Схема электрическая принципиальная	
	Рабочая частота 400 *гц*. Условия эксплуатации: в наземной аппаратуре. Масса: $G_М + G_{СТ}$ = 0,885 *кг*.

номер обмотки	номера выводов	Режим холостого хода				Номинальный режим	
		U, *в*.	R, *Ом* 20°С	$U_{ИСП}$, *в*. на корпус	$U_{ИСП}$, *в*. между обмотками	$U_{НОМ}$, *в*.	$I_{НОМ}$, *А*
I	1, 2	220	2,43	1350	1700	220	0,932
II	3, 4	305	6,99	1700	1700	300,3	0,4
III	5, 6	18,3	0,0797	200	1350	18,3	2,78
Ток холостого хода						*А*	0,192
Потери в стали						*Ватт*	3,97
Превышение температуры						*°С*	50,7

Сериков Александр Владимирович.

Расчет трансформаторов малой мощности.
Учебное издание. Учебное пособие.
Научный редактор – кандидат технических наук, доцент Р. В. Кузьмин.

Редактор Т. Н. Карпова.
Подписано в печать 23.09.2015.
Формат 60 ✕ 84 1/16. Бумага 65 *г/м*². Ризограф EZ570E.
Усл. печ. л. 4,42. Уч.–изд. л. 4,24. Тираж 70 экз. Заказ 27334.

Редакционно–издательский отдел
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
"Комсомольский на Амуре государственный технический университет"
681013, г. Комсомольск на Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
"Комсомольский на Амуре государственный технический университет"
681013, г. Комсомольск на Амуре, пр. Ленина, 27.

Rev. 01 29 Apr 2023